

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้สารดูดซับ

สำหรับการศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพตัวดูดซับโลหะหนักในการวิจัยนี้ใช้หินพัมมิชและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน เช่น พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เนื่องจากหินพัมมิชเป็นหินภูเขาไฟที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวา มีลักษณะเป็นเส้นใยและช่องว่างจำนวนมาก ซึ่งช่องว่างนั้นคือรูพรุนที่เกิดจากการระเหยของก๊าซต่างๆและไอน้ำ ส่วนที่เป็นเส้นใยคือเนื้อหินซึ่งประกอบด้วยแก้วภูเขาหรือลูมิโนซิลิเกต ทำให้หินพัมมิชมีสมบัติเฉพาะตัวที่สามารถนำไปใช้ในการดูดซับความชื้นและของเหลวต่างๆ ซึ่งเหมาะแก่การนำมาทำการวิจัยนอกจากนี้ยังหาซื้อได้ง่ายภายในประเทศ

1.1 พอลิเมอร์

พอลิเมอร์คือสารที่สังเคราะห์ได้จากการนำโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และมีโครงสร้างเหมือนกัน เรียกว่ามอนอเมอร์ (monomer) มาเรียงต่อกันด้วยพันธะเคมีเป็นสายโซ่ยาว ซึ่งหากเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแตกต่างกันไปพอลิเมอร์บางชนิดเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ บางชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้น ตัวอย่าง เช่น สไตรีน (styrene) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ในการเตรียม พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) ซึ่งใช้ผลิตโฟมหรือแก้วกาแฟ หรือการใช้เอทิลีน (ethylene) เพื่อสังเคราะห์พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ที่ใช้เป็นถุงใส่อาหาร

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม ใช้ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการอนุมูลอิสระ (free radical polymerisation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุด 60 เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ได้ง่ายและรวดเร็ว ถึงแม้ว่าสารตั้งต้นจะมีการปนเปื้อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันที่เร็ว ทำให้กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอนุมูลอิสระมีจุดค้อย คือขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์จะไม่เท่ากัน (broad distribution) ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอและไม่เหมาะต่อการนำมาประยุกต์ใช้กับงานเฉพาะทาง ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาวิธีที่ลดข้อด้อยดังกล่าว โดยสังเคราะห์พอลิเมอร์ประเภทคอนโทรล/ลิฟวิง (controlled/living) ผ่านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีวิธีหลักๆอยู่สามวิธีด้วยกัน ได้แก่ NMP (nitroxide mediated polymerization) ATRP (atom transfer radical polymerization) และRAFT (Reversible addition fragmentation chain transfer polymerization) วิธี NMP เป็นวิธีแรกที่ถูก

ค้นพบ ใช้ได้กับมอนอเมอร์เพียงบางชนิดและต้องใช้อุณหภูมิในการพอลิเมอร์ไรเซชันสูง ส่วนวิธี ATRP ถึงจะแก้ปัญหาจุดอ่อนที่เกิดจากวิธี NMP ได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีการตกค้างของโลหะหนักซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้น ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรเลียและฝรั่งเศสได้คิดค้นวิธีที่เรียกว่า RAFT หรือ MADIX (Macromolecular Design via the Interchange of Xanthates) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีหลักการคล้ายกัน แตกต่างเพียงสูตรโครงสร้างของ MADIX จะเป็นสารประกอบพวก Xanthate

การศึกษาคัดซับโลหะหนักผ่านหินพัมมิช ได้มีการพัฒนาด้วยการเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่างหินพัมมิชกับพอลิเมอร์ประเภทต่างๆ ซึ่งเตรียมผ่านกระบวนการ controlled/living radical เช่น สไตรีนหรืออนุพันธ์ของสไตรีน โดยปกติจะใช้แอมโมเนียมไทโอซัลเฟต หรืออนุพันธ์ของสารประกอบเอโซ (Azo) เป็นสารตั้งต้น โดยที่การทดลองนี้จะเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นสารแลกเปลี่ยนสายโซ่ที่ใช้กับระบบราฟ (RAFT) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถควบคุมความยาวของสายโซ่ได้ พอลิเมอร์หรือเรซินที่เตรียมได้จะมีประจุบวกอยู่ภายในโครงสร้างของสายโซ่ จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้เช่นเดียวกับกรณีการใช้หินพัมมิชและสามารถนำมาปรับใช้ให้เข้ากับอุตสาหกรรมต่างๆ ได้หลายแขนงซึ่งมีการใช้หินพัมมิช ดังกล่าวแล้วได้แก่ อุตสาหกรรมฟอกเสื้อผ้า อุตสาหกรรมการเพาะปลูก วัสดุกรองสำหรับบ่อกรองปลา และวัสดุสำหรับเตาอย่าง เป็นต้น

1.2 พอลิเมอร์จากธรรมชาติ

พอลิเมอร์จากธรรมชาติถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยตรงไม่ต้องผ่านกระบวนการทางเคมี คือ กัดตาเพอชา (gutta percha) ซึ่งได้จากยางต้นไม้ในมาเลเซียเนื่องจากมีสมบัติยืดหยุ่นและทนทาน จึงถูกนำมาใช้ผลิตลูกกอล์ฟในช่วงปี ค.ศ. 1848-1900 จากนั้นเปลี่ยนมาใช้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่ได้จากการสังเคราะห์ คือ สารประกอบไอออนอเมอร์ (ionomer) ที่มีความแข็งแรงกว่า ปัจจุบันกัดตาเพอชาถูกนำมาใช้ทางทันตกรรมในการเป็นวัสดุอุดคลองรากฟัน

1.3 พอลิเมอร์สังเคราะห์

ในปี ค.ศ. 1909 มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์เป็นครั้งแรก โดย L. Baekeland นักเคมีชาวอเมริกันเชื้อสายเบลเยียมพบว่าเมื่อผสมฟีนอล (phenol) กับฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) เข้าด้วยกัน แล้วให้ความร้อน และกลั่นเอาน้ำออกโดยกระบวนการควบแน่น (condensation) จะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะข้นเหนียวเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะแข็งตัวเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะในการใช้เป็นฉนวนหุ้มสายไฟต่อมาพอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกเรียกว่า เบคเคลไลท์ (Bakelite) ตามชื่อของ

Baekleland หรือฟีนอลิก เรซิน (phenolic resin) ตามชื่อของมอนอเมอร์ที่ใช้ (ฟีนอลและฟอร์มาลดีไฮด์)

การค้นพบเบคเคลไลท์ นับเป็นการบุกเบิกงานวิจัยและพัฒนาทางด้านพอลิเมอร์ที่สำคัญยิ่ง เนื่องจากนำไปสู่การสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่หลากหลายในปัจจุบันที่มีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน กันน้ำได้ดี ความ โปร่งแสง และสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น

1.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบ่งเป็น 2 ประเภทตามกลไกของปฏิกิริยา (polymerization mechanisms) คือ

1.4.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติม (Addition polymerization) หรือกลไกแบบต่อสายโซ่ (Chain-growth polymerization) โดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติม นั้น เป็นการต่อมอนอเมอร์เข้าไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ครั้งละหนึ่งหน่วยตามลำดับจนได้สายโซ่ยาวของพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาเริ่มจากการใช้สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) มาสร้างพันธะกับมอนอเมอร์ 1 หน่วยก่อน จากนั้นจึงสร้างพันธะเชื่อมกับหน่วยมอนอเมอร์อื่นทีละหน่วยๆ จนได้สายโซ่ยาวในที่สุด มอนอเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาประเภทนี้จะต้องมีพันธะคู่ (double bond) ในหน่วยโมเลกุล ซึ่งโดยทั่วไปใช้หมู่ไวนิล ($-\text{CH}_2=\text{CH}-$) พันธะ π (bond) ในพันธะคู่นี้จะแตกตัวเพื่อสร้างพันธะใหม่ และจะเชื่อมต่อกับมอนอเมอร์หน่วยต่อไป ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์พอลิไวนิล คลอไรด์ (polyvinyl chloride) หรือ PVC

1.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymerization) หรือกลไกแบบขั้น (step-growth polymerization) การเตรียมมอนอเมอร์ผ่านวิธีการนี้ มอนอเมอร์ต้องมีหมู่ฟังก์ชันอย่างน้อยเป็นประเภท ได้ฟังก์ชัน และมีอย่างน้อยสองฟังก์ชันนัลที่สามารถทำปฏิกิริยากันได้ เช่นปฏิกิริยาระหว่าง adipic acid กับ hexamethylene diamine

1.5 รูปแบบการใช้งานของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานในชีวิตประจำวันแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 4 แบบคือ

1.5.1 เส้นใย เป็นพอลิเมอร์กลุ่มที่แข็งแรงที่สุด เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใย มีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องรับแรงในแนวแกนเส้นใยให้ได้สูงสุด เส้นใยจึงมีลักษณะทางกายภาพ ที่ดูเบาบาง แต่มีความแข็งแรงสูง

1.5.2 พลาสติก มีความแข็งแรงรองจากเส้นใย แม้ว่าการใช้งานพลาสติก จะมีมิติ ความกว้าง ยาว สูง มากกว่าเส้นใยหลายเท่า ทำให้ดูเหมือนว่าแข็งแรง แต่ถ้าวางนำพลาสติกไปฉีก ให้มีความบางเท่าเส้นใย จะพบว่าแข็งแรงน้อยกว่ามาก

1.5.3 ยาง มีจุดเด่นคือความยืดหยุ่นสูง เราจึงไม่เปรียบเทียบเรื่องความแข็งแรง แต่ มักจะคำนึงถึงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด (elongation at break) และแรงดึงที่จุดขาด (load at break) นอกจากนี้พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จำเป็นต้องมีการคืนตัวกลับได้ดีด้วย (recovery property) จึง ต้องมีการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่โมเลกุลด้วยการเชื่อมขวาง (crosslink) ซึ่งจุดที่เชื่อมขวางนี้ ควรจะอยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสม เนื่องจากหากถี่เกินไป ยางที่ได้จะมีลักษณะแข็งไม่ยืดหยุ่น ในขณะที่ถ้าห่างเกินไป ก็จะได้ยางที่มีลักษณะนิ่มเกินไป

1.5.4 สารละลายและลาเทกซ์ใช้งานในรูปของพอลิเมอร์ที่กระจายตัวในของเหลว อื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวทำละลายของพอลิเมอร์เอง หรือกระจายตัวเป็นอิมัลชันในน้ำพอลิเมอร์กลุ่มนี้ ได้แก่ กาว สีทาบ้าน เซแล็ก หรือ สารเคลือบผิวอื่น ๆ ซึ่งมีสมบัติกระจายตัวได้ดี และมีความสามารถในการเชื่อมขวางได้ในสภาวะที่มีแสง หรือแก๊สออกซิเจนได้ หรือไม่ก็สามารถที่จะ นำตัวเองไปเกี่ยวพัน (entanglement) กับวัสดุอื่น ๆ ได้

1.6 โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ และคุณสมบัติ โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์

ลักษณะโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ โครงสร้างแบบสายโซ่ตรง (linear) โครงสร้างแบบกิ่ง (branch) และโครงสร้างแบบร่างแห (cross-linked network) ซึ่งการมี โครงสร้างสายโซ่ที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์และลักษณะการคง ตัวหลังการขึ้นรูป โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงและแบบกิ่ง เมื่อให้ความร้อน หลังการขึ้นรูปแล้วจะอ่อนตัวและหลอมเหลว จึงสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้อีกครั้ง โดย กระบวนการรีไซเคิล พอลิเมอร์ชนิดนี้เรียกว่าเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน ส่วนพอลิเมอร์อีกประเภทหนึ่ง คือ เทอร์โมเซต นั้นหลังจากขึ้นรูปแล้วเมื่อให้ความร้อนจะไม่อ่อน ตัวแต่จะคงรูปอยู่จนสลายตัวหรือเกิดการเผาไหม้ จึงไม่สามารถนำมาหลอมเพื่อใช้งานใหม่ทั้งนี้ เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปนั้น โครงสร้างของพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่เป็นแบบ

ร่างแห โดยกระบวนการเชื่อมโยงข้าม (crosslink) เช่น ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) และพอลิยูรีเทน (polyurethane)

1.7 เรซิน

เรซินเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตพลาสติคชนิดโพลีเอสเตอร์เรซินไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นของเหลวหนืดเหมือนน้ำเชื่อม กับสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพอลิเมอร์สูง หรือเรียกว่าตัวทำแข็ง (Hardener) มีลักษณะเป็นสารกึ่งของแข็ง ที่ได้จากธรรมชาติหรือเป็นสารสังเคราะห์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและไม่แสดงจุดค่าจุดหลอมเหลว ประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายสั้น เช่น เอทิลีน โพรพิลีนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันจากโมเลกุลสายสั้นซึ่งเป็นหนึ่งหน่วยโมโนเมอร์มารวมตัวกันเป็นพลาสติกซึ่งมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ เรียกว่าพอลิเมอร์รวม (Copolymer) เรซินที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีความแข็งตัวและมีลักษณะเป็นฟิล์มที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือหลอมเหลวอีกต่อไปถึงแม้จะเพิ่มความร้อนมีสมบัติที่ดีคือสามารถทนความร้อนได้ถึง 120 องศาเซลเซียสและเป็นสารที่นิยมใช้ในฐานะ solid support เนื่องจากมีหลายหมู่ฟังก์ชันทำให้สามารถทนทานต่อตัวทำละลายได้มากกว่าของแข็งประเภทอื่น มีเรซินบางประเภทที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปเช่น Merrifield, Wang และ JandaJel สำหรับ Merrifield Resin เป็นเรซินที่นิยมมากที่สุด โครงสร้างประกอบด้วยสายโซ่พอลิสไตรีนที่ถูกเชื่อมด้วยโมเลกุลของไดไวนิวเบนซีน ส่วนการขยายตัวของเม็ดเรซินขึ้นอยู่กับประเภทของตัวทำละลายที่ใช้

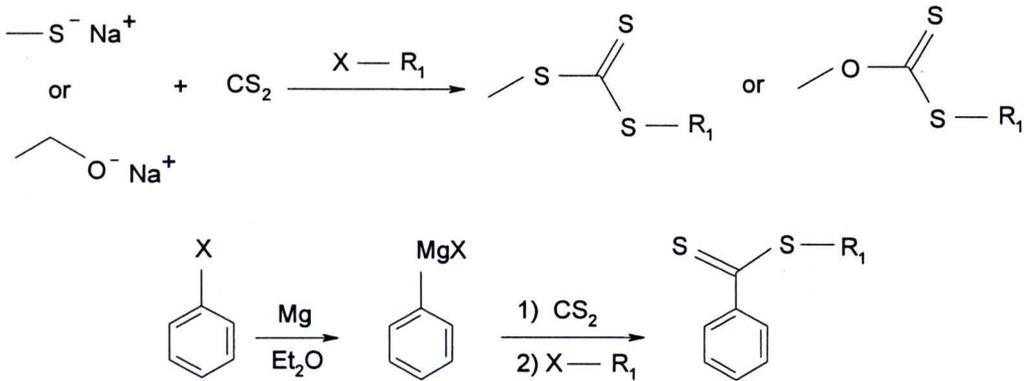
1.8 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบคอนโทรล/ลิฟวิ่ง (controlled/living) ผ่านอนุมูลอิสระ

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการอนุมูลอิสระ (free radical polymerisation) เป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุดถึงร้อยละ 60 เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ได้ง่ายและรวดเร็ว ถึงแม้ว่าสารตั้งต้นจะมีการปนเปื้อนบ้างก็ตาม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เร็ว ทำให้กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอนุมูลอิสระมีจุดค้อย กล่าวคือขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์จะมีขนาดไม่เท่ากัน (broad distribution) ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอหากจะนำมาประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะทาง เมื่อช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาวิธีที่ลดข้อด้อยดังกล่าว โดยสังเคราะห์พอลิเมอร์เป็นประเภทที่เรียกว่า คอนโทรล/ลิฟวิ่ง (controlled/living) ผ่านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีวิธีหลักๆอยู่สามวิธีด้วยกัน ได้แก่ NMP (nitroxide mediated polymerization) ATRP (atom transfer radical polymerization) และ RAFT (Reversible addition fragmentation chain transfer polymerization) วิธี

NMP เป็นวิธีแรกที่ถูกค้นพบ ได้กับมอนอเมอร์เพียงบางชนิดและต้องใช้อุณหภูมิในการพอลิเมอร์ไรเซชันสูง ส่วนวิธี ATRP ถึงจะแก้ปัญหาคืออันที่มาจากวิธี NMP ได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีการตกค้างของโลหะหนักซึ่งเป็นสารเคมีหลักในวิธี ATRP นักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรเลียและฝรั่งเศส ได้คิดค้นวิธีที่เรียกว่า RAFT หรือ MADIX (Macromolecular Design via the Interchange of Xanthates) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีหลักการคล้ายกัน แตกต่างเพียงสูตรโครงสร้างของ MADIX จะเป็นสารประกอบพวก Xanthate

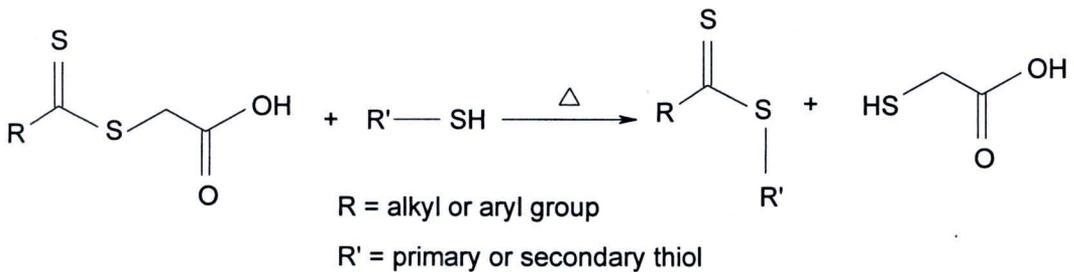
การเตรียม RAFT หรือ MADIX มีวิธีการสังเคราะห์ได้ทั้งสิ้น 9 วิธีด้วยกันดังนี้

- 1.8.1 ปฏิกริยาระหว่าง carbodithioate salt กับ alkylating agent (ภาพที่ 2.1)
- 1.8.2 ปฏิกริยา transesterification ระหว่าง carboxymethyl dithiocarboxylate กับ thiol (ภาพที่ 2.2)
- 1.8.3 ปฏิกริยา thionation บนตำแหน่งของ carbonyl group กับ cyclictetrathio phosphates (P_4S_{10}) หรือกับ สารละลายของ Davy หรือสารละลายของ Lawessons (ภาพที่ 2.3)
- 1.8.4 กระบวนการแทนที่ของอนุมูลอิสระบนตำแหน่งเอสเทอร์ (ภาพที่ 2.4)
- 1.8.5 กลไกปฏิกิริยาผ่าน Michael addition (ภาพที่ 2.5)
- 1.8.6 กลไกปฏิกิริยาผ่าน Markovnikoff addition (ภาพที่ 2.6)
- 1.8.7 การสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระของสาร bis(thioacyl)disulfide (ภาพที่ 2.7)
- 1.8.8 ปฏิกริยากับสารประกอบ 1,1'-thiocarbonyl diimidazole (TCDI) (ภาพที่ 2.8)
- 1.8.9 การเปลี่ยน initiator ของ ATRP ไปเป็นสารแลกเปลี่ยนสายโซ่ในกระบวนการ RAFT



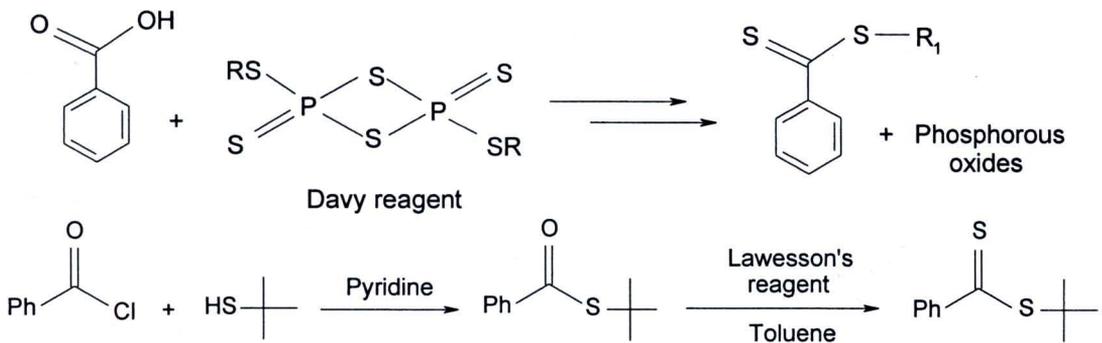
ภาพที่ 2.1 ปฏิกริยาระหว่าง carbodithioate salt กับ alkylating agent

จากภาพที่ 2.1 จะเห็นว่า xanthate หรืออนุพันธ์ของ xanthate ทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดซัลไฟด์ จะได้เกลือของสารประกอบ ออกแทนโนซัลเฟอร์ที่มีหมู่ไทโอคาร์บอนิลไทโอ (หรือ ไคไทโอเอสเทอร์) หลังจากนั้นทำปฏิกิริยากับอัลคิลเฮไลด์กลายเป็นสารแลกเปลี่ยนสายโซ่ (chain transfer agent)



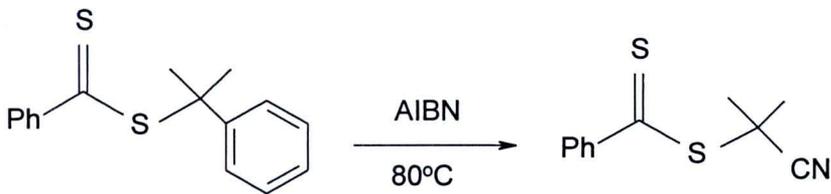
ภาพที่ 2.2 ปฏิกริยา transesterification ระหว่าง carboxymethyl dithiocarboxylate กับ thiol

ปฏิกิริยา transesterification ระหว่าง carboxymethyl dithiocarboxylate กับ thiol โดย รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิของ thiol สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบ thiocarbonylthio group ดังภาพที่ 2.2



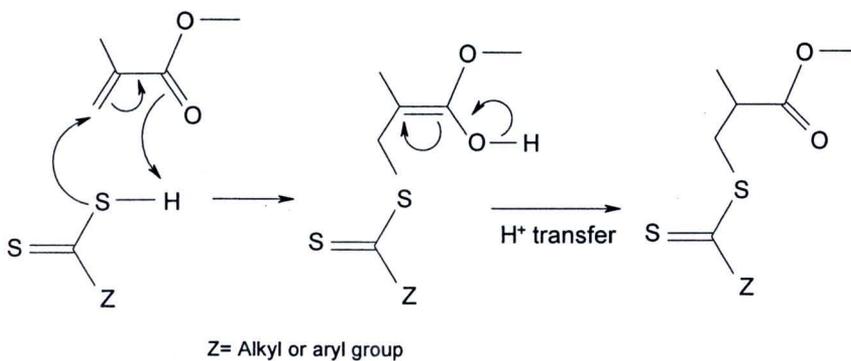
ภาพที่ 2.3 ปฏิกริยากับสารละลายของ Davy หรือสารละลายของ Lawessons

สารประกอบระหว่าง ฟอสฟอรัสกับซัลเฟอร์ เช่น Davy reagent ถูกนำมาทำปฏิกริยากับกรดคาร์บอกซิลิก ซัลเฟอร์ใน Davy reagent จะเข้าไปแทนที่ ออกซิเจนในกรดคาร์บอกซิลิกเกิดเป็นสารแลกเปลี่ยนสายโซ่ประเภท thiocarbonylthio group พร้อมกับฟอสฟอรัสออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงดังแสดงในภาพที่ 2.3



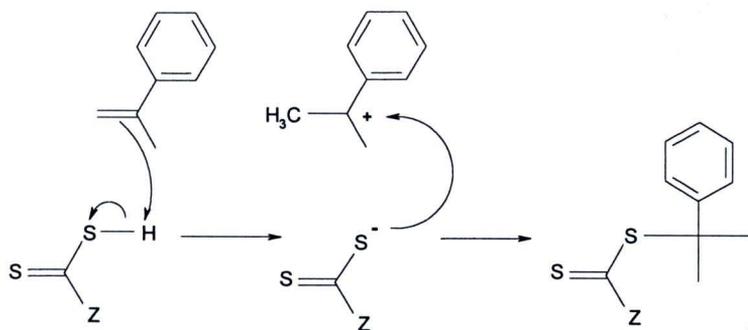
ภาพที่ 2.4 กระบวนการแทนที่ของอนุมูลอิสระบนตำแหน่งเอสเทอร์

สารประกอบ AIBN จะสลายตัวออกเป็นอนุมูลอิสระประเภท tertiary ซึ่งเข้าไปแทนที่หมู่อำลาเดิม (leaving group)

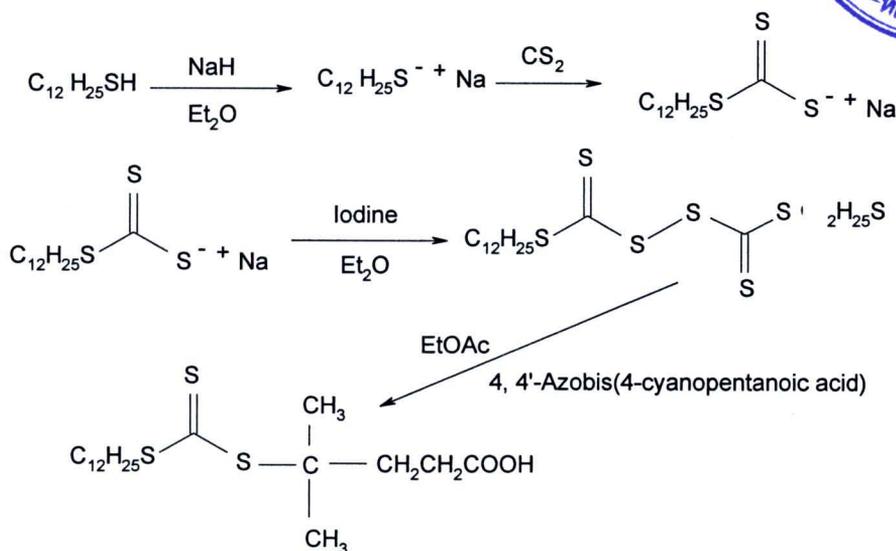


ภาพที่ 2.5 กลไกปฏิกริยาผ่าน Michael addition

มอนอเมอร์บางประเภท เช่น อนุพันธ์ของ methacrylate สามารถทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับหมู่ dithio ester ผ่านขบวนการ H⁺ tranfer ซึ่งขั้นตอนนี้เราเรียกว่าการเกิดปฏิกิริยาผ่าน Michael addition แต่ก็มีมอนอเมอร์บางประเภทที่เลือกเกิดผ่านกระบวนการเติมประเภท Markovnikoff

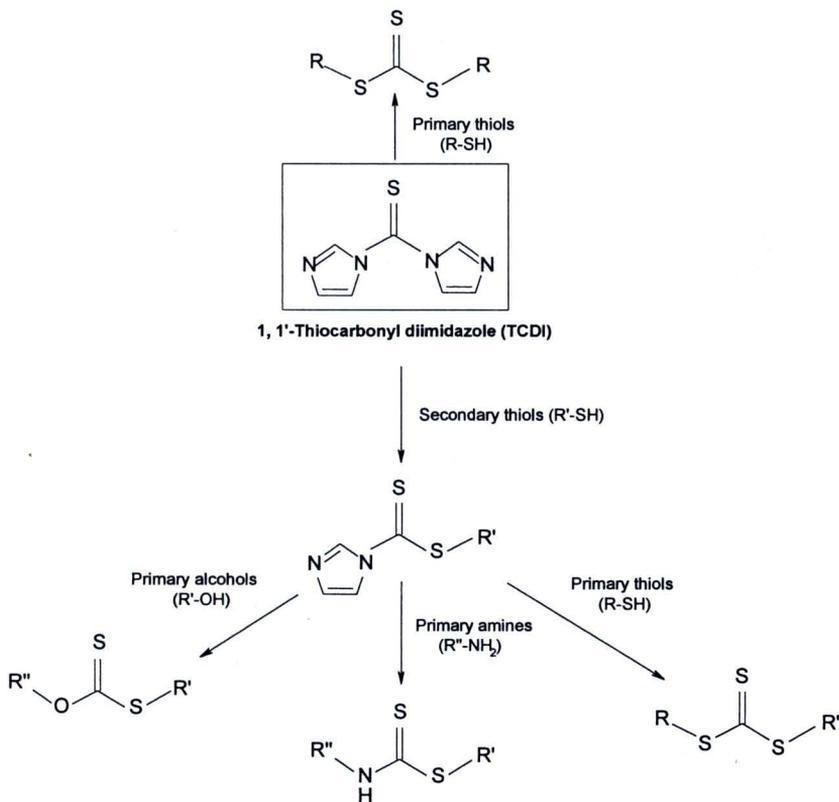


ภาพที่ 2.6 กลไกปฏิกิริยาผ่าน Markovnikoff addition



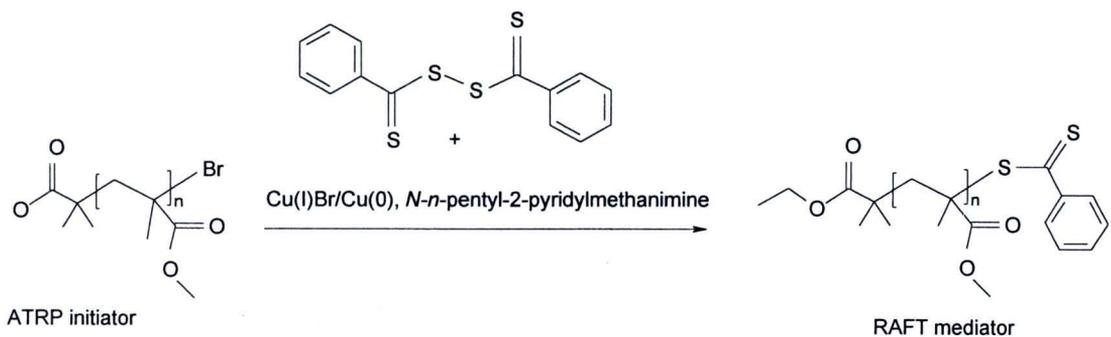
ภาพที่ 2.7 การสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระของสาร bis (thioacyl) disulfide

ส่วนภาพที่ 2.7 เป็นการเกิดสารประกอบ thiocarbonylthio ผ่าน bridging ของ bis (thioacyl) disulfide ทำปฏิกิริยากับสารประกอบพวก azo compound โดยหนึ่งโมเลกุลของ azo compound จะได้อนุพันธ์ของ thiocarbonylthio สองโมเลกุล ส่วนใหญ่วิธีการนี้มักใช้เตรียมสารประกอบพวก trithiocarbonate



ภาพที่ 2.8 ปฏิกริยากับสารประกอบ 1,1'-thiocarbonyl diimidazole

ได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมใหม่โดย M. Woods และคณะ ด้วยการใช้ diimidazole เป็นสารตั้งต้น ส่วน imidazole จะทำหน้าที่เป็นหมู่อำลาโดย diimidazole จะทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์หรือหมู่ไทออลที่เหมาะสม ตามภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยน initiator ของ ATRP ไปเป็นสารแลกเปลี่ยนสายโซ่ในกระบวนการ

RAFT

ในภาพที่ 2.9 แสดงถึงการเปลี่ยนพอลิเมอร์ที่ถูกเตรียมจากวิธี ATRP และยังมีฮาโลเจนอยู่ที่ปลายสายโซ่ ให้กลายเป็น macrochaintransfer agent ซึ่งจะทำให้สามารถเตรียมโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะในแต่ละบล็อกที่ไม่เหมือนกันได้

1.9 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

1.10 กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง สารละลายหรือสารแขวนลอยนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) แก๊ส (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว- ของเหลว แก๊ส-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid – SolidInterface) ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกแยกออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก กระบวนการถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับนี้เกิดขึ้นได้จนกระทั่งถึงภาวะสมดุลจึงหยุดซึ่งในขณะนั้นความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะ โมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

1.11 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการกำหนดชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยว

นั้นทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

1.12 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้ซึ่งมีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายและเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้รวดเร็วด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

1.13 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง และมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งหมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยากเพราะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

1.14 แหล่งกำเนิด โลหะหนัก (Heavy metal)

แหล่งกำเนิดโลหะหนัก ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะสำคัญ คือ (ปิยะพร คงอุบล, 2544 : 7)

1.14.1 แหล่งอุตสาหกรรม โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ จึงทำให้โอกาสที่โลหะหนักจะปนเปื้อนกับน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทเป็นไปได้สูง

1.14.2 แหล่งเกษตรกรรม เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เกษตรกรมีการนำยากำจัดศัตรูพืชมาใช้กำจัดแมลง และเชื้อโรคต่างๆ ยากำจัดศัตรูพืชเหล่านี้หลายชนิดมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ สลายตัวในธรรมชาติได้ยากและมักจะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ

1.14.3 แหล่งชุมชน เป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำได้มากส่วนใหญ่เป็นโลหะที่ปนอยู่ในสิ่งปฏิกูล เช่น ขยะมูลฝอยซึ่งมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น กระดาษ สีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย กากหม้อแบตเตอรี่ และภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะหนัก เป็นต้น

1.15 การสะสมของโลหะหนัก

โลหะหนักชนิดต่างๆ ในแหล่งน้ำ จะสะสมอยู่ในตัวกลาง เช่น ดินตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอย่างอิสระในปริมาณต่างๆ กัน โลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้ สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้และการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้ (โสภภาพรรณ จิรินริตติชัย, 2534 : 228)

การสะสมของโลหะในน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำมีทั้งในรูปที่ละลายน้ำ (dissolved) และอยู่ในรูปสารแขวนลอย (suspended solid) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในสารแขวนลอยจะมีเวลาที่อยู่ในน้ำ (residence time) ยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำได้

การสะสมของโลหะหนักในดินตะกอน ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากการสะสมตามธรรมชาติ ได้แก่ การชะล้างเกลือแร่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณนั้นและอีกส่วนหนึ่งเป็นผลจากการใช้และการปล่อยโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ อันเนื่องมาจากการทำกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โลหะหนักสามารถสะสมอยู่ในดินตะกอนที่ปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าอยู่ในน้ำมาก องค์ประกอบของดินตะกอนที่เกิดจากการสะสมของโลหะหนัก ได้แก่ คาร์บอนเนต ออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็ก ตลอดจนองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ (จิระ จตุรานนท์, 2526 : 71)

การสะสมโลหะหนักในพืชซึ่งได้รับจากดิน น้ำและอากาศนั้นจะสามารถถูกสะสมได้ในทุกส่วนของพืช เพราะโลหะหนักสามารถเข้าสู่พืชได้ทางราก ลำต้น และใบ กระบวนการดูดดึงและสะสมโลหะหนักของรากพืชจากดินเริ่มตั้งแต่รากดูดดึงโลหะหนักอาจโดยกระบวนการดูดซึมอย่างรวดเร็ว (active ion absorption) หรือกระบวนการดูดซึมผ่าน (passive ion absorption) อาจดึงดูดโดยวิธีแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) หรือวิธีการคายน้ำ (convection) กลไกเกิดขึ้นในขณะที่พืชดูดน้ำเพื่อทดแทนการคายน้ำ ทำให้เกิดภาวะความเข้มข้นที่ผิวหน้า (concentration gradient) อย่างกะทันหันที่บริเวณรากพืช โลหะหนักจึงเคลื่อนที่โดยวิธีการแผ่จากดินเข้าสู่ราก ส่วนวิธีการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากไปสู่ยอด (translocation) ยังสรุปแน่นอนไม่ได้ (ศิราณี ศิริสุโขดม, 2535 : 16)

1.16 ความเป็นพิษของโลหะหนัก

ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน บางชนิดเป็นพิษสูง แม้จะมีความเข้มข้นที่ต่ำ เช่น พรอท และแคดเมียม บางชนิดถึงแม้เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต แต่ถ้ามีมากเกินไปอาจเป็นอันตรายได้ เช่น ทองแดง และสังกะสี (นิภา รอดน้อย, 2537 : 67)

เมื่อโลหะหนักเข้าสู่กระแสเลือด และถูกลำเลียงไปยังอวัยวะต่างๆ จะทำลายและสะสมในอวัยวะนั้นๆ ขึ้นอยู่กับกลไกปฏิกิริยาและปริมาณที่ได้รับ ความเป็นพิษที่เกิดจากการได้รับโลหะหนักที่อันตราย มีดังนี้

1.16.1 พิษเฉียบพลัน (acute toxicity) ได้รับโดยการกิน หายใจ หรือดูดซึมผ่านผิวหนังเพียงครั้งเดียวแล้วทำให้เกิดอาการที่เห็นได้ชัด

1.16.2 พิษกึ่งเฉียบพลัน (subacute toxicity) เกิดอาการระหว่างพิษเฉียบพลันกับเรื้อรัง ซึ่งอาจใช้เวลานานถึง 90 วัน

1.16.3 พิษเรื้อรัง (chronic toxicity) จะกินเวลานาน เกิดจากการได้รับโลหะหนักนั้นซ้ำแล้วซ้ำอีก ในปริมาณไม่สูงอาจกินเวลาเป็นเดือนหรือเป็นปี

ความเป็นพิษของโลหะหนักเกิดจากการรบกวนเมตาบอลิซึมของเซลล์ที่สำคัญคือการรบกวนการทำงานของเอนไซม์ โลหะหนักที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) สูง เช่น ทองแดง พรอท และเงิน จะยึดจับกับกลุ่มอะมิโนและซัลไฮดริล (sulfhydryl) ของเอนไซม์ และขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่มีกลุ่มธาตุเหล่านี้ประกอบอยู่ ความเป็นพิษ

ของโลหะหนักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของโลหะ ขนาด หรือปริมาณที่ได้รับ เส้นทางที่เข้าสู่ร่างกาย ระยะเวลาที่ได้รับ ความแตกต่างของความต้านทานในแต่ละบุคคล อายุ และมาตรการป้องกันที่เข้มงวดในการใช้สารเคมี เป็นต้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้สารดูดซับ

ทิพย์วิมล เกิดอ้อม (2522) ได้ทำการศึกษา การขจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสีย โดยการดูดซับบนไคโตซานรูปแบบต่างๆ เช่น เกล็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกลูคาร์ลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซานและเม็ดอะมิเนตไคโตซาน ที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อภาวะที่เป็นกรดและเบส ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการดูดซับทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ในส่วนของการทดลองแบบกะตัวแปรที่ศึกษาคือ พีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม และระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลของไคโตซาน การศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีทองแดงปนเปื้อนอัตราการไหลของน้ำเสียต่างกัน ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพ หลังการดูดซับไอออนทองแดงด้วยสารละลายกรดไนตริกที่มีระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริก ที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงเท่ากับ 5 สำหรับทุกรูปแบบของไคโตซาน และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียมเท่ากับ 5 สำหรับ เกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซาน พีเอชเท่ากับ 6 สำหรับไคโตซานรูปแบบอื่นๆ เม็ดอะมิเนตไคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมได้สูงกว่า เมื่อเทียบกับไคโตซานรูปแบบอื่นๆ ปริมาณไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับ 345 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 333 มิลลิกรัม ต่อ กรัม ตามลำดับ การศึกษาสมมูลของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์ การดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียด้วยไคโตซานในการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสีย ไคโตซานที่นำมาฟื้นฟูคุณภาพแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก

พุทธิสาร ชัยพันธุ์ (2538) ศึกษาการแยกโครเมียมจากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะเพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการชุบใหม่ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายโครเมียมไดรอกไซด์ (CrO_3) ในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ สารละลายที่ได้เป็นสารละลายของโครมิกที่ประกอบด้วย โมโนโครเมต (HCrO_4) และไดโครเมต

($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) โดยให้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเรซินแบบต่างแก่ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดคือเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราไหลที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 10-40 Bv/hr คือ เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมและอัตราการไหลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง

คลเดช ตั้งตระการพงษ์ (2539) ศึกษาการใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินเพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก โดยเป็นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เกิดด้วยเรซินแบบกรดแก่ และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมด้วยเรซินแบบต่างแก่ ผลการทดลองพบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียได้ตามมาตรฐานเมื่อความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นไม่เกิน 650 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่กักกันในชั้นเรซินต้องมากกว่า 3 นาที

นิคม จึงอยู่สุข (2544) หินพัมมิช เป็นหินประเภทหนึ่งที่เกิดจากการระเบิดอย่างรุนแรงของแมกมาในภูเขาไฟ ในขณะที่แมกมาปะทุพ่นด้วยความรุนแรงนั้น แมกมาได้ระเบิดออกมาพร้อมกับฝุ่น ก๊าซ เถ้า ไอ้ น้ำ และเกิดเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดหินที่มีลักษณะเฉพาะ คือ มีลักษณะเป็นเส้นใย มีช่องว่างจำนวนมาก มีความพรุนสูง น้ำหนักเบา และอาจลอยน้ำได้ แสดงให้เห็นภาพขยายของหินพัมมิชชั้นซึ่งจะเห็นช่องว่างได้อย่างชัดเจน ช่องว่างในหินเหล่านั้นคือ รูพรุนของโพรงก๊าซ และไอ้ น้ำที่หนีหายไป จากลักษณะดังกล่าวทำให้หินพัมมิชมีพื้นผิวที่มาก โดยหินพัมมิชขนาด 1 กรัม อาจมีพื้นที่ผิวได้ถึง 13 ตารางเมตร

จิตตกานต์ สิ้นธุเสก (2544) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบทองแดงเชิงซ้อน (Cu-EDTA) โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ซึ่งในการทดลองเป็นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน โดยให้น้ำเสียไหลผ่านเรซินชนิดต่างแก่หรือทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ ผลการทดลองพบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างแก่มีความเหมาะสมในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงถึง 99.85% นอกจากนี้ยังศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่จากการรีเจนเนอเรชันเรซินที่หมดสภาพด้วยโซเดียมออกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ 6% โดยน้ำหนักอัตราการรีเจนเนอเรชันที่เหมาะสมคือ 4.5 BV/hr ใช้เวลาในการรีเจนเนอเรชันประมาณ 60 นาที จะสามารถนำทองแดงกลับได้ประมาณ 95.71%

ธเรศ ศรีสถิต (2544) ทำการวิจัยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป

โดยทำการทดสอบค่าไอโอดีนนมเบอร์ ศึกษาลักษณะทางกายภาพ การทดสอบไอโซโทมการดูดติดผิวแบบฟรุนคลิช และการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ทำการป้อนน้ำเสียแบบไหลลง ด้วยอัตราการไหล 3 ลิตรต่อชั่วโมง และเก็บตัวอย่างที่ระดับความสูงของสารดูดซับ 0.30, 0.60, 0.90 และ 1.20 เมตร ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีค่าไอโอดีน 532.29 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 492.4200 ตารางเมตรต่อกรัม การทดสอบไอโซโทมการดูดติดผิวแบบฟรุนคลิชโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 8.37 และ 5.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 2.45, 2.57, 2.69 และ 2.81 มิลลิกรัม/กรัม และดูดซับปรอทได้ 2.21, 2.45, 2.45 และ 2.70 มิลลิกรัม/กรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.824 และ 9.830 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีนเท่ากับ 486.45 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิว 385.9073 ตารางเมตรต่อกรัม การทดสอบไอโซโทมการดูดติดผิวแบบฟรุนคลิชโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดสอบไอโซโทมการดูดติดผิวแบบฟรุนคลิชพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อกรัม การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.83, 3.83, 3.75 และ 3.88 มิลลิกรัม/กรัม และดูดซับปรอทได้ 3.61, 3.83, 3.61 และ 3.72 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.853 และ 9.865 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

สุชาดา สุทธิพิบูลย์ (2547) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดูกที่ใช้เป็นสารดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด จากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) และอาร์เซนิก (As (V)) โดยถ่านกระดูกที่ใช้ในการทดลองมีการเตรียมแตกต่างกัน 4 สภาวะ และทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาถึงสภาวะการเตรียมถ่านกระดูก และสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดได้แก่เวลาสัมผัส และพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น ปริมาณถ่านกระดูก รวมถึงการศึกษาไอโซโทมการดูดซับแบบฟรุนคลิช และแบบแลงมัวร์ จากนั้นนำสภาวะการทดลองกำจัดตะกั่วที่เหมาะสมไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกในน้ำเสียจริง โดยตัวแปรควบคุมที่ใช้ตลอดการทดลองแบบแบทช์คือ น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ทดลอง 25 มิลลิลิตร และความเร็วในการกวนผสม 250 รอบ/นาที จากการศึกษาพบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าอาร์เซนิกมาก และเมื่อเพิ่มพีเอชน้ำ

เสียจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นด้วย ซึ่งถ่านกระดูกสภาวะที่ 3 ที่เตรียมขึ้นจากการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH ปริมาณถ่าน 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย มีความเหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 100 หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 401.65 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่าน และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลองแสดงให้เห็นว่า กระบวนการกำจัดนั้นเกิดจากการดูดซับตะกั่วโดยไฮดรอกซิอะพาไตต์ สำหรับถ่านสภาวะที่ 1 ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นใดๆ นั้นมีความเหมาะสมต่อการกำจัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุด คือให้ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 13.76 หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.22 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อกรัมถ่าน เมื่อปรับพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า ถ่านกระดูกให้ลักษณะการดูดซับตะกั่วและอาร์เซนิกตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช สำหรับการทดลองใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น 185 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงได้ถึงร้อยละ 94.33 เมื่อใช้ถ่านกระดูกในปริมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

สาวตรี ดิตตานนท์ (2550) ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับปะรด จากการศึกษาพบว่าเรซินที่ไม่ปรับสภาพมีการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล ชนิดปรับสภาพด้วยสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ 5 % และปรับสภาพด้วยสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ 37% ตามลำดับ

วิชชุดา ไชยะโชค และ สุธา ขาวเชียร (2552) ได้ทำการศึกษาการบำบัด น้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้กากของเหลวเขียวจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเป็นสารดูดซับ การเติบโตของภาคอุตสาหกรรม ได้ก่อให้เกิดของเสียจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่ได้ถูกนำไปฝังกลบ ดังนั้นการนำของเสียต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์จึงมีแนวโน้มที่จะได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งกากของเหลวเขียวเป็นของเสียจำนวนมากที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ และมีคุณสมบัติที่อาจจะนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการใช้กากของเหลวเขียวสำหรับดูดซับโครเมียม และทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม การดำเนินการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองแบบกวนผสมสมบูรณ์ในระบบแบบตลิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง และทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอม มิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในน้ำเสียก่อน และหลังจากเขย่า ซึ่งน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์คือ ค่าความเข้มข้นโครเมียม และ ทองแดง เท่ากับ

200 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และโครเมียมผสมทองแดงที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยวิธีการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจะทำการเขย่าเป็นเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง วิธีการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมจะทำการปรับค่าพีเอชเป็น 2 ถึง 9 และวิธีการหาไอโซเทอมนั้นจะทำการปรับปริมาณกากของเหลวเขียวเป็น 0 ถึง 1.2 กรัม/100มิลลิตร นอกจากนี้จะทำการศึกษาการคายออกของโลหะโดยใช้เครื่องมือโครเวฟ ผลการวิจัยพบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม และทองแดงมีค่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และทองแดงเท่ากับ 7-9 และไอโซเทอมที่เหมาะสมกับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย คือ ไอโซเทอมของฟรอนดริช และไอโซเทอมของแลงเมียร์ แต่การดูดซับทองแดงนั้นไม่เป็นไปตามไอโซเทอมของการดูดซับทั้งสองชนิด เนื่องจากเกิดกระบวนการตกตะกอนขึ้นเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้การคายออกของโลหะหนักยังมีปริมาณน้อยกว่าค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำกากของเหลวเขียวมาใช้ในระบบการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น เพื่อกำจัดโลหะหนักบางส่วนก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย

Bassabi; A. *et al*(1996) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักจำพวก alkaline เช่น Sr และ Cs จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง X-ray fluorescense spectrophotometry พบว่าการใช้หินพัมมิสจากธรรมชาติสามารถดูดซับโลหะเหล่านี้ได้

Catalfolmo, P. *et al*(2006) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและที่ 100 องศาเซลเซียส ถึงการดูดซับโลหะหนักด้วยหินพัมมิส โดยโลหะหนักทั้งหกชนิดได้แก่ Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+} จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในช่วง 100 – 500 mg/g ซึ่งจากการทดลองพบว่าการแลกเปลี่ยนโลหะโซเดียมกับโลหะอื่นๆ โดยจะต้องควบคุม ค่าความเป็นกรดและด่างให้อยู่ในช่วง 4 – 5 เพื่อรักษาโครงสร้างของหินพัมมิส และ Mustafa, Y;*et al*ทำการทดลองเกี่ยวกับการดูดซับ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ระหว่างบนหินพัมมิส และบนสารประกอบคอมพอสิตโดยที่หินพัมมิสกับพอลิเมอร์ชนิด polyacrylonitrile จะใช้ตามกรรมวิธีแบบ batch ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินพัมมิสและสารประกอบคอมพอสิตโดยทำการระบุค่า pH ที่เริ่มต้นทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า สารประกอบคอมพอสิตสามารถดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าการใช้หินพัมมิสเพียงอย่างเดียว

Isagai, H. (2008) พบว่าขนาดของหินพัมมิสยังมีขนาดเล็กลงจะทำให้การดูดซับของโลหะหนักซึ่งในกรณีนี้คือ แคดเมียมและซิงค์ดีขึ้น

ปัจจุบันนักธรณีวิทยายอมรับว่าวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุในเชิงธรณีวิทยาสามารถใช้วิธีของ ICP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Larocque; A. C. L. และ Rasmussen; P. E.)