Research Article

Received: April 26, 2018; Accepted: May 17, 2018

อนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส : การเตรียมและการประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับโคบอลต์(II)

Agarose Coated Magnetite Nanoparticles: Preparation and Application for Cobalt(II) Adsorption

เพชรลดา สัญชยานุกูล, สุดารัตน์ พรเพชรไพบูรณ์ และศศิธร มั่นเจริญ*

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Phetlada Sanchayanukun, Sudarat Pornpetphaiboon and Sasithorn Muncharoen*

Chemistry Department, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Muang, Chon Buri, 20131

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ด้วยอะกาโรส (agarose) โดยอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่ได้เตรียมจากวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) ระหว่างเหล็ก(II) [Fe(II)] และเหล็ก(III) [Fe(III)] และศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอะกาโรส และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) รวมทั้งระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมสารละลายต่าง ๆ สำหรับการเคลือบอะกาโรสบนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ พิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) นอกจากนี้ในการดูดซับที่ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้อนุภาคที่เตรียมได้ในการดูดซับโคบอลต์(II) ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ในการดูดซับที่ศึกษา ได้แก่ พีเอชของสารละลายโคบอลต์(II) เวลาในการดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพการชะ (elution) และไอโซเทอมการดูดซับ โดยตรวจวัดปริมาณโคบอลต์(II) ด้วยเทคนิควิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีอาศัยการเกิดสารเชิงซ้อนที่มีสีระหว่างโคบอลต์(II) กับไดไธโซน (DTZ) ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสที่เตรียมขึ้นมีประสิทธิภาพการดูดซับ และร้อยละประสิทธิภาพการชะ มีค่าเท่ากับ 2.93 มิลลิกรัมต่อลิตร และร้อยละ 91 ตามลำดับ

คำสำคัญ : แม่เหล็กนาโน; อะกาโรส; โคบอลต์(II); เทคนิควิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี; วิธีการตกตะกอนร่วม

Abstract

The study of synthetic optimal conditions for agarose coated magnetite nanoparticles was presented in this work. The magnetite nanoparticles were prepared by using co-precipitation

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** muncharoen@go.buu.ac.th **doi:** 10.14456/tstj.2019.48

method of Fe(II)/Fe(III). The factors that affected on coating of agarose including agarose and sodium hydroxide concentrations and reaction times were investigated. The prepared particles were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT- IR) and transmission electron microscopy (TEM) techniques. Moreover, the conditions for cobalt(II) adsorption using these particles for instant pH of the cobalt(II) solution and adsorption time including elution and adsorption isotherms were studied. The cobalt(II) analysis was determined by using visible spectrophotometry based on colored complex-formation of cobalt(II) and DTZ (dithizone) at λ_{max} 570 nm. It was observed that the adsorption efficiency and percentages of desorption of the synthetic magnetic nanoparticles were 2.93 mg/l and 91 %, respectively.

Keywords: magnetic nanoparticle; agarose; cobalt(II); spectrophotometry; co-precipitation method

1. บทนำ

ปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวกับอนุภาคนาโน (nanoparticle) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะสมบัติพิเศษที่โดดเด่นและแตกต่างจากอนุภาคขนาดปกติ จึงทำให้สามารถนำอนุภาคนาโนเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ หลายด้าน ซึ่งสมบัติพิเศษนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน และหนึ่งในอนุภาคนาโนที่ได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้ คือ อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ [1-3] โดยพบว่ามีการนำอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ไปเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในหลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [4] เป็นตัวกลางในการขนส่งยา [5] ช่วยเพิ่มความคมชัดในการถ่ายภาพด้วยคลื่นสนามแม่เหล็ก (MRI) [6,7] และการประยุกต์ใช้ในงานด้านวิเคราะห์ต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคการแยก การสกัด เป็นต้น [8] นอกจากนี้พบว่าอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ยังเป็นที่นิยมนำไปใช้ในงานด้านการดูดซับ โดยใช้อนุภาคนาโนแมกนีไทต์นี้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำทิ้งหรือระบบบำบัดน้ำทิ้ง เนื่องจากสามารถลดข้อจำกัดในการแยกตัวดูดซับหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับ และสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำอีก งานวิจัยในปัจจุบันมีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ โดยการดัดแปลงพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยวัสดุต่าง ๆ ตัวอย่าง เช่น คาร์บอน [9] โพลีฟีนอล [10] ซิลเวอร์/ซิลิกอนออกไซด์ [11,12] อะลูมินาออกไซด์ [13] กรดฮิวมิก [14] อย่างไรก็ตาม พบว่าการนำพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) มาใช้พัฒนาพื้นที่ผิว เป็นหนึ่งในการดัดแปลงพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์ชีวภาพนั้น มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) และยังสามารถสลายตัวง่าย (degradability) จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (environmental friendly) [6,15,16]

พอลิเมอร์ชีวภาพที่ประยุกต์ใช้ในการดูดซับมีหลากหลายชนิดด้วยกัน เช่น ไคโตซาน (chitosan) มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับเมทิลออเรนจ์ [17] สังกะสี(II) [18] และทองแดง(II) [15] ในแหล่งน้ำทิ้ง โดยสามารถสร้างพันธะกับไอออนหรือโลหะหนักต่าง ๆ ด้วยหมู่เอมีน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) การนำเจลาติน (gelatin) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพอีกชนิดหนึ่งมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับตะกั่ว(II)และโรดามีนบี

ในแหล่งน้ำ [16,19,20] โดยสามารถสร้างพันธะกับไอออนหรือโลหะหนักต่าง ๆ ด้วยหมู่เอมีน ($-NH_2$) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) นอกจากนั้นยังพบว่ามีการนำอะกาโรสมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับยูเรเนียม(VI) [21] ตะกั่ว(II) [22] โครเมียม(VI) และไตรโคโรเอทิลีน [2] เป็นต้น โดยพอลิเมอร์ชีวภาพดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้หลักการเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) หรือการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดพันธะกับไอออนอื่น ๆ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าการประยุกต์ใช้อะกาโรสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพในด้านการดูดซับยังคงมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำอะกาโรสซึ่งเป็นสายพอลิเมอร์ของ D-galactose และ 3,6-anhydro-L-galactose เรียงต่อกัน จึงประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หลายหมู่ที่สามารถปรับเปลี่ยนด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ [23] เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และยังมีความสามารถในการทนต่อสารละลายที่มีค่าพีเอชกว้างตั้งแต่ 0 ถึง 14 [24,25] มาเคลือบบนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก รวมทั้งง่ายต่อการกำจัด และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อการประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำทิ้งต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

สารเคมีทุกชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกรดวิเคราะห์ (AR-grade) และเตรียมโดยใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized water) เฟอริกคลอไรด์ (Fluka, Switzerland) เฟอรัสคลอไรด์เตตระไฮเดรต (Panreac,Barcelona) 25 wt% แอมโมเมียมไฮดรอกไซด์ (QRec, New Zealand) กรดไฮโดรคลอริก (Lobachemie, India) อะกาโรส (Vivantis, Malaysia) โซเดียมไฮดรอกไซด์(Ajax Finechem, New Zealand) และ 4 % span80 (Fluka, Switzerland) ในสารละลายไซโคลเฮกเซน (Merck, Germany) เพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส สารละลายโคบอลต์คลอไรค์เฮกซะไฮเดรต (Ajax Finechem, New Zealand) ใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน (stock solution) สารละลายไดไธโซน (Loba Chemie, India) ในเตตระไฮโดรฟูแรน (Merck, Germany) ใช้เป็นรีเอเจนต์ในการเกิดสารเชิงซ้อน โดยตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น specord 210 plus (Analytik Jena Co., Ltd, Germany) และใช้สารละลายกรดไนตริก (QReC, New Zealand) สำหรับการชะอนุภาคที่พัฒนาขึ้น

2.2 การเคลือบอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยอะกาโรส

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์นี้ใช้วิธีการตกตะกอนร่วมระหว่างเหล็ก(II) และเหล็ก(III) ดังสมการ $2FeCl_3 + FeCl_2 + 8NH_3 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_{4(s)} + 8NH_4Cl$ (1) [26] โดยนำสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์นี้มาจากภาคนิพนธ์ของ ชลธิชา [27]

ส่วนของการเคลือบอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยอะกาโรสนั้น ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Safdarian และคณะ (2013) [28] โดยเตรียมอะกาโรสที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร จากนั้นนำอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่สังเคราะห์ได้หนัก 0.1000 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายอะกาโรสอยู่ เขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายแล้วเติม span 80 ในไซโคลเฮกเซน ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร เขย่าสารละลาย เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว แยกอนุภาคนาโนแมกนีไทต์

เคลือบอะกาโรสที่ได้ด้วยแท่งแม่เหล็กแรงสูง เพื่อนำสารละลายอะกาโรสที่เหลือออก จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ตามด้วยสารละลายเอทานอล (50 %v/v) แล้วเก็บอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสในสารละลายเอทานอล (20 %v/v) ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วขนาดเล็ก และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้

การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ (อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ อะกาโรส และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส) ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยชั่งผงแห้งของอนุภาคหนัก 2 มิลลิกรัม ผสมกับโปแตสเซียมโบรไมด์ (KBr) หนัก 200 มิลลิกรัม บดและอัดเป็นแผ่นบาง และนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ส่วนการศึกษาขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเตรียมโดยชั่งอนุภาคนาโนแมกนีไทต์และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่เคลือบด้วยอะกาโรสหนักอย่างละ 0.0100 กรัม ละลายในเอทานอล 1 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นปิเปตสารละลายปริมาตร 0.5 ไมโครลิตร หยดลงบน Grid (Formvar Film on 400, FF 400-H-CH) วางไว้ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

2.3 การวิเคราะห์โคบอลต์(II) ด้วยเทคนิควิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

นำสารละลายไดไธโซน (dithizone, DTZ) เข้มข้น 4.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย 0.2 โมลาร์ แอมโมเนีย ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร แล้วปิเปตสารละลายโคบอลต์(II) ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ทิ้งไว้ 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร [29]

2.4. การดูดซับโคบอลต์(II) บนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรส

2.4.1 ชนิดโลหะต้นแบบ

สำหรับการศึกษาเบื้องต้นได้ใช้อนุภาคนาโนแมกนีไทต์และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสและอะกาโรส เพื่อเป็นตัวดูดซับสารละลายโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โครเมียม(VI) เหล็ก(III) โคบอลต์(II) และทองแดง(II) โดยตรวจวัดด้วยเกิดสารเชิงซ้อนกับไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1, 5-diphenylcarbazide, DPC) โปตัสเซียมไธโอไซยาเนต (potassium thiocyanate, KSCN) ไดไธโซน และไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (diethyldithiocarbamate, DDTC) ตามลำดับ [29]

2.4.2 สภาวะการดูดซับโคบอลต์(II) ด้วยอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

งานนี้ได้ดูดซับโคบอลต์(II) บนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส และการตรวจวัดโคบอลต์(II) ด้วยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไดไธโซน โดยชั่งอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส 0.0200 กรัม ใส่ขวดแก้วขนาดเล็ก แล้วเติมสารละลายโคบอลต์(II) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร นำไปเขย่า เมื่อครบกำหนด เวลาแยกอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสโดยใช้แท่งแม่เหล็กความแรงสูง จากนั้นนำสารละลายโคบอลต์(II) ที่เหลือจากการดูดซับปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร เติมสารละลายไดไธโซนเข้มข้น 4.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5.00 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที นำสารละลายดังกล่าวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ โดยได้หาสภาวะที่เหมาะสม

ของขั้นตอนในการการดูดซับโคบอลต์(II) บนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส ได้แก่ ผลของพีเอช ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อะกาโรส และสารลดแรงตึงผิว (span 80) รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการดูดซับโคบอลต์(II)

2.4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยใช้สารละลายโคบอลต์(II) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

นำอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสที่สังเคราะห์ขึ้นมาดูดซับสารละลายโคบอลต์(II) ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม) จากนั้นนำสารละลายไปหาความเข้มข้นเหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และนำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II) ดังสมการ $q_e = [(C_0-C_e) \times V] \div m$ (2) เมื่อ q_e คือ ประสิทธิภาพของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม); C_0 และ C_e คือ ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ; V คือ ปริมาตรของตัวถูกดูดซับ (ลิตร); m คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม) จากนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามทฤษฎีของแลงเมียร์และฟรุนดิช

2.5 การชะสารละลายโคบอลต์(II) จากอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

สำหรับการศึกษาการชะโคบอลต์(II) จากอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส หลังจากดูดซับในครั้งที่ 1 ล้างอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ดังกล่าวด้วยน้ำกลั่น แล้วแยกอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยแม่เหล็กความแรงสูง จากนั้นชะโคบอลต์(II) ที่ดูดซับบนด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เขย่า แล้วนำสารละลายกรดไนตริกที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโคบอลต์(II) สำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะสารละลายโคบอลต์(II) จากอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส ได้แก่ ชนิดของตัวชะ (eluent) ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกและระยะเวลาที่ใช้ในการชะ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1. การเตรียมและการเคลือบสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบ

3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์

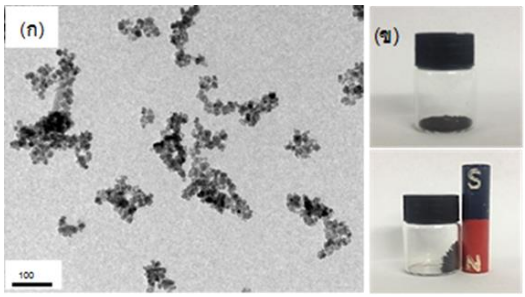
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของเหล็ก(II) และเหล็ก(III) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และอัตราการกวนสารละลายที่ 1,225 รอบต่อนาที) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ และมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กที่สามารถถูกดูดภายใต้สนามแม่เหล็ก (ดังรูปที่ 1ข) เมื่อนำอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้ไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ดังกล่าวมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (8.88±2.30 นาโนเมตร) (ดังรูปที่ 1ก)

3.1.2 ชนิดโลหะต้นแบบ

การศึกษาชนิดของโลหะต้นแบบในการดูดซับด้วยอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้นเบื้องต้น โดยการใช้โลหะทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ โครเมียม(VI) เหล็ก(III) โคบอลต์(II) และทองแดง(II) โดยใช้ประสิทธิภาพในการการดูดซับของโลหะเหล่านี้เพื่อเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา และผลการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสมีประสิทธิภาพในการดูดซับโคบอลต์(II) สูงสุด (ดังตารางที่ 1) ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกโคบอลต์(II) เป็นโลหะต้นแบบในการศึกษาการดูดซับของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ศึกษาด้วยอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ อะกาโรส และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

ชนิดโลหะ	ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	อนุภาคนาโนแมกนีไทต์	อะกาโรส	อนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส
โครเมียม(VI)	1.18	0.09	1.08
เหล็ก(III)	0.39	0.02	1.06
โคบอลต์(II)	0.75	0.12	1.99
ทองแดง(II)	0.00	0.13	0.38

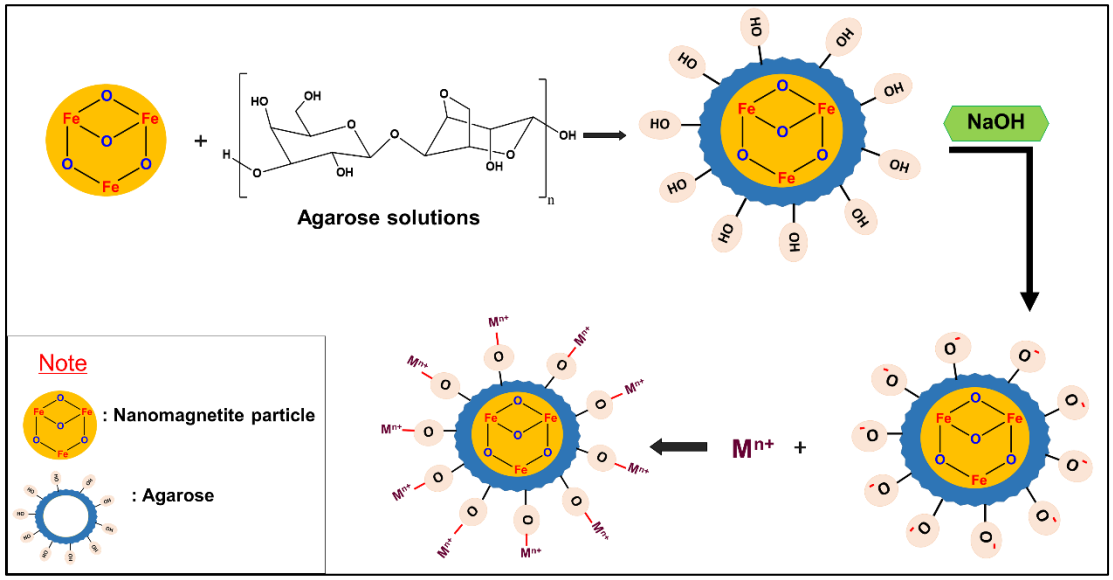


รูปที่ 1 (ก) ภาพถ่ายอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 17,500x และ (ข) ภาพถ่ายอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่สังเคราะห์ได้ (บน) และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก (ล่าง)

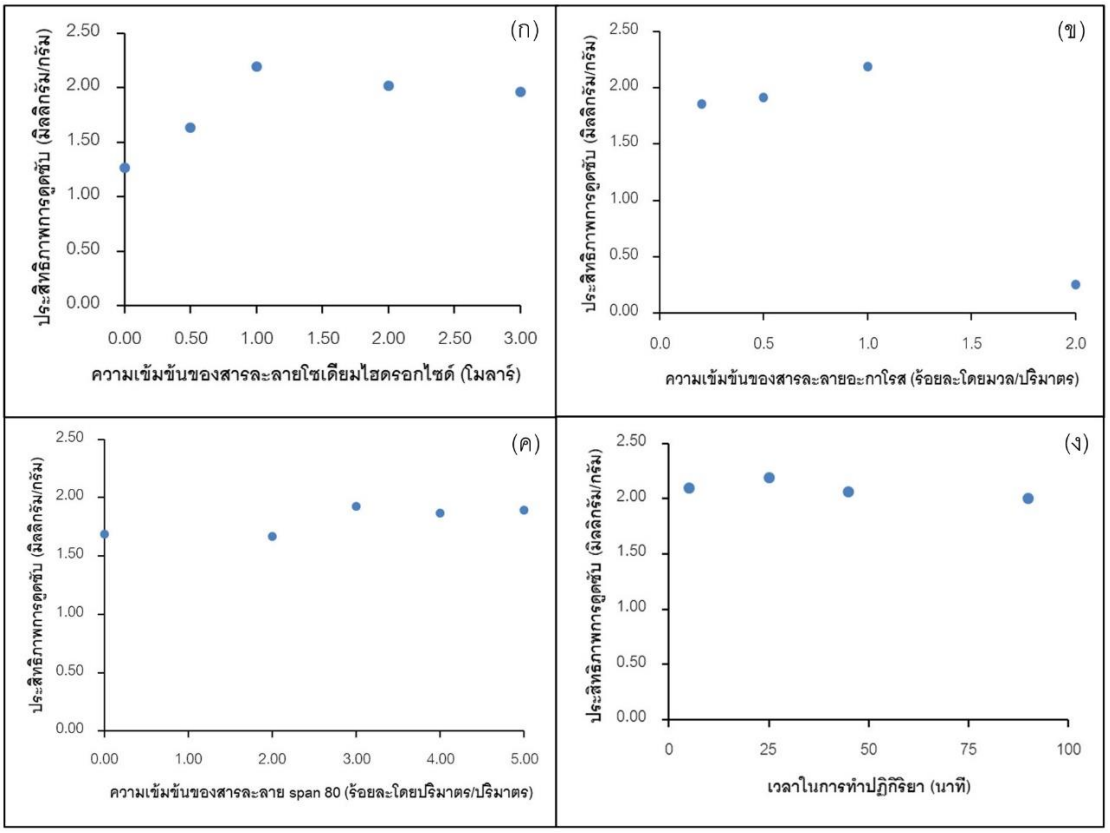
3.1.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบอะกาโรสบนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์

รายงานวิจัยของ Li และคณะ (2011) [30] ได้นำเสนอการใช้อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่เคลือบด้วยอะกาโรสพอลิเมอร์ สำหรับดูดซับโลหะ 2 ชนิด คือ ยูเรเนียม [U(VI)] และ ยูโรเพียม [Eu(III)] ซึ่งรายงานวิจัยนี้ได้รายงานว่าอะกาโรสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก ดังนั้นหากมีการปรับสภาพผิวของอะกาโรสพอลิเมอร์ให้มีประจุลบก่อน ก็สามารถเกิดแรงดึงดูดกับโลหะซึ่งมีประจุบวกดี ดังนั้นหากมีการนำอะกาโรสพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ [28, 31] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ อีกทั้งยังง่ายต่อการแยกอนุภาคของตัวดูดซับออกจากตัวอย่างหรือแหล่งน้ำทิ้งโดยการใช้สนามแม่เหล็ก และด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงพัฒนาอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่เคลือบอะกาโรส โดยทำให้อะกาโรสเกิดพอลิเมอไรซ์ล้อมรอบอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก และมีการปรับสภาพผิวของอะกาโรสให้มีประจุเป็นลบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะได้ดี นอกจากนี้ยังง่ายต่อการแยกอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ออกจากแหล่งน้ำ และจากรูปที่ 2 แสดงภาพจำลองของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรสที่มีการปรับสภาพผิวให้พร้อมที่จะดูดซับโลหะ

สำหรับผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบอะกาโรสบนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับโคบอลต์(II) จากการปรับสภาพผิวของอะกาโรสพอลิเมอร์ให้มีประจุลบด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโคบอลต์(II) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.50-1.00 โมลาร์ และเริ่มคงที่ตั้งแต่ความเข้มข้น 1.00-3.00 โมลาร์ แสดงดัง



รูปที่ 2 ภาพจำลองของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสที่มีการปรับสภาพผิวให้พร้อมที่จะดูดซับโลหะ



รูปที่ 3 กราฟการศึกษาผลของความเข้มข้นของ (ก) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ข) สารละลายอะกาโรส (ค) span 80 และ (ง) ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II)

รูปที่ 3ก ทั้งนี้เพราะเมื่อพื้นผิวของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรสมีประจุเป็นลบก็สามารถสร้างแรงดึงดูดกับโลหะซึ่งมีประจุบวกดี ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.00 โมลาร์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพผิวของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรสต่อไป

การศึกษาความเข้มข้นอะกาโรสที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II) พบว่าอะกาโรสเข้มข้น 1.0 %w/v มีประสิทธิภาพในการดูดซับโคบอลต์(II) ได้ดีที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะกาโรสเป็น 2.0 %w/v พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II) ลดลง ดังรูปที่ 3ข ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อยและมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กลดลงจากเดิม ดังนั้นจึงเลือกใช้อะกาโรสที่เข้มข้น 1.0 %w/v เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาต่อไป

การศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย span 80 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II) ทดลองโดยการเติม span 80 เข้มข้น 0.00-5.00 %v/v พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (1.69-1.89 มิลลิกรัมต่อกรัม) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ span 80 ที่ 3.00-5.00 %v/v พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับโคบอลต์(II) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 3ค) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้สารละลาย span 80 ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 4.00 %v/v เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

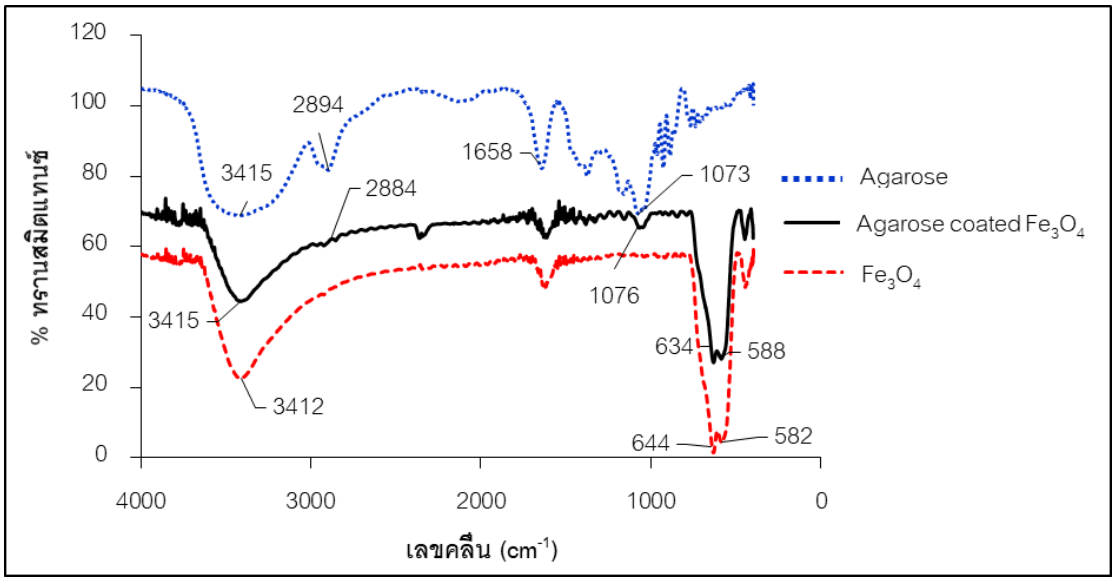
นอกจากนี้รายงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาช่วงเวลาสำหรับการปรับสภาพพื้นผิวของอะกาโรสพอลิเมอร์ ทั้งนี้เพราะประจุลบจากเบสอาจมีผลต่อการดูดซับโคบอลต์(II) จากการศึกษาพบว่าช่วงเวลาที่ศึกษามีประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3ง

3.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์

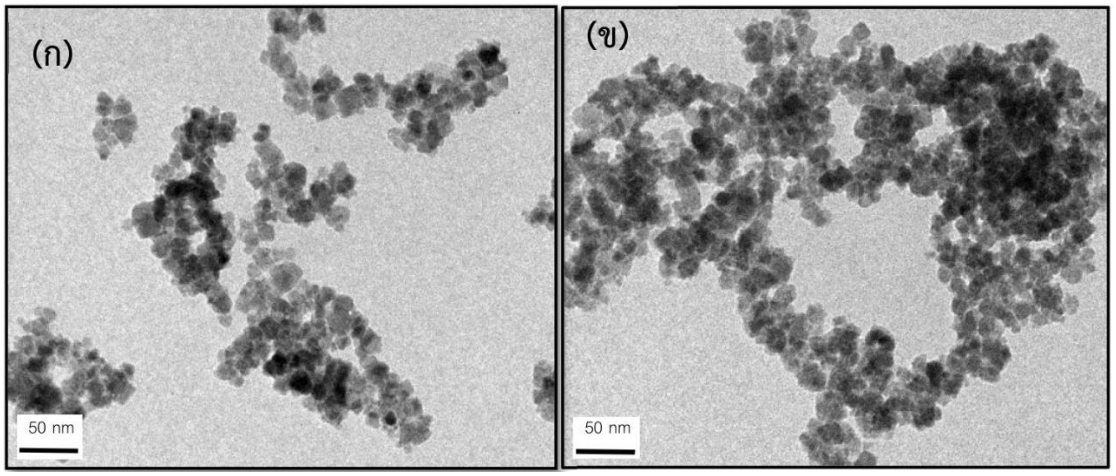
(1) เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีโดยการวิเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์อะกาโรส และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่เคลือบด้วยอะกาโรส พบว่าสเปกตรัมของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (เส้นประสีแดง) แสดงดังรูปที่ 4 จะปรากฏพีคสำคัญที่ตำแหน่ง 3,412, 644 และ 582 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mohammadi และ Barikani [30] และ Amiri และคณะ [1] ที่ศึกษาสเปกตรัมของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เช่นกัน และรายงานว่าพีคที่ตำแหน่ง 3,200-3,600 cm^{-1} เป็นพีคของ O-H stretching และพีคที่ตำแหน่งระหว่าง 500-600 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ Fe-O ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญในโครงสร้างของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ ส่วนสเปกตรัมของอะกาโรส (เส้นประสีน้ำเงิน) จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 3,415, 2,894, 1,658 และ 1,073 cm^{-1} โดยแสดงหมู่ฟังก์ชันของ O-H stretching, C-H stretching, O-H bending และ C-O stretching ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงายวิจัยของ Li และคณะ [31] และ Hu และคณะ [32] เมื่อปรับเปลี่ยน (modify) สภาพพื้นผิวอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ด้วยอะกาโรส (เส้นทึบสีดำ) จากการศึกษาจะพบพีคของ Fe-O ที่ตำแหน่ง 634 และ 588 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ และพบพีค O-H stretching, C-H stretching และ C-O stretching ที่ตำแหน่ง 3,415, 2,884 และ 1,076 cm^{-1} ตามลำดับ ดังนั้นจากผลสเปกตรัมที่ปรากฏแสดงให้เห็นว่าอะกาโรสสามารถถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ ผลการทดลองแสดง ดังรูปที่ 4

(2) การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) โดยภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8.88±2.30 นาโนเมตร (ดังรูปที่

5ก) และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนพื้นผิวด้วยการเคลือบอะกาโรส พบว่าอนุภาคมีขนาดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 18.60±3.50 นาโนเมตร (ดังรูปที่ 5ข) ประกอบกับผลของการศึกษาด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีแสดงให้เห็นว่าอะกาโรสสามารถเคลือบบนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ ทั้งนี้เพราะขนาดที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคและมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่บ่งบอกว่ามีทั้งอนุภาคนาโนแมกนีไทต์และอะกาโรสร่วมอยู่



รูปที่ 4 FT-IR สเปกตรัมของอะกาโรส (เส้นประสีน้ำเงิน) อนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส (เส้นทึบสีดำ) และอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (เส้นประสีแดง)



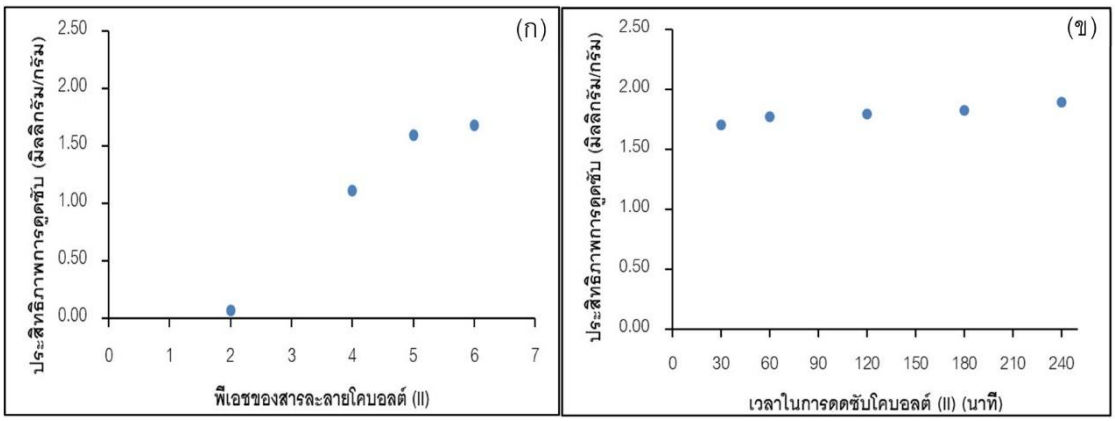
รูปที่ 5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านกำลังขยาย 175,000x ของ (ก) อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ และ (ข) อนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

3.2 ผลการศึกษาการดูดซับโคบอลต์(II) บนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

3.2.1 สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับโคบอลต์(II)

สำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโคบอลต์(II) บนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส เริ่มจากการศึกษาผลกระทบของพีเอชที่มีต่อการดูดซับโคบอลต์(II) ตั้งแต่พีเอช 2-6 ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 6ก ทั้งนี้เพราะโคบอลต์ที่อยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 7 โคบอลต์จะอยู่ในรูปของไอออน [โคบอลต์(II), Co^{2+}] และที่พีเอชต่ำ ๆ (พีเอช 2-4) จะมีจำนวนของ H^+ มาก ซึ่งจะเกิดการแข่งขันกับโคบอลต์(II) [33] จึงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอช 5-6 แต่สำหรับค่าพีเอชมากกว่า 7 จะทำให้โคบอลต์(II) เกิดการตกตะกอนเป็น $Co(OH)^+$, $Co(OH)_2$ และ $Co(OH)_3^-$ [34] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกพีเอชที่ใช้ในการดูดซับโคบอลต์(II) เท่ากับ 6 เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

นอกจากพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับแล้ว งานวิจัยนี้ยังศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับโคบอลต์(II) เนื่องจากเวลาที่นานขึ้นอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้นด้วย แต่จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับจาก 30 ถึง 240 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังรูป 6ข ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงเลือกเวลาที่ใช้ในการดูดซับโคบอลต์(II) ที่ 120 นาที เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

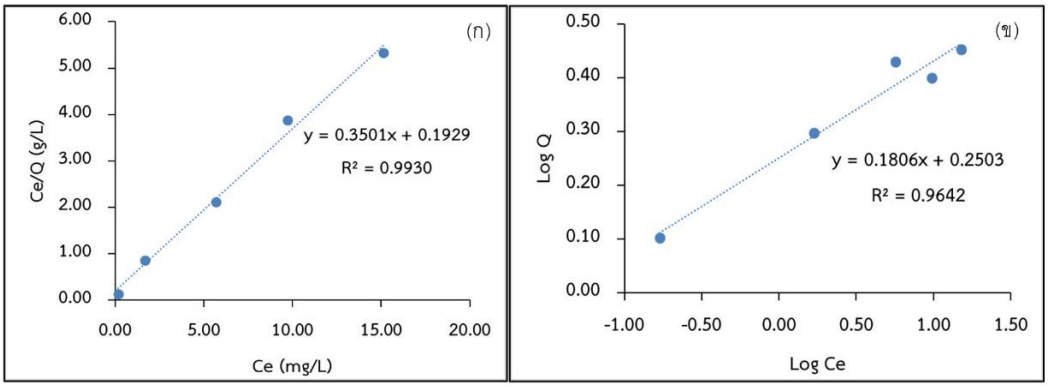


รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับ (ก) พีเอชของสารละลายโคบอลต์(II) และ (ข) เวลาในการดูดซับโคบอลต์(II)

3.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับโคบอลต์(II) ของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรส

โดยการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโคบอลต์(II) ของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรส จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำค่า C_e/q_e และ C_e มาสร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (รูปที่ 7ก) ในขณะที่นำค่า Log q_e และ Log C_e มาสร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (รูปที่ 7ข) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิช มี

ค่าเท่ากับ 0.9930 และ 0.9642 ตามลำดับ ดังนั้นการดูดซับโคบอลต์(II) ของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรส จึงสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับนี้เป็นการดูดซับแบบเคมีและเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว [35] มีค่าการประสิทธิภาพดูดซับสูงสุด (q_m) และค่าคงที่ในการดูดซับ (K_L) เท่ากับ 2.86 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1.8149 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 (ก) กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และ (ข) กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (R^2) ของสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริช

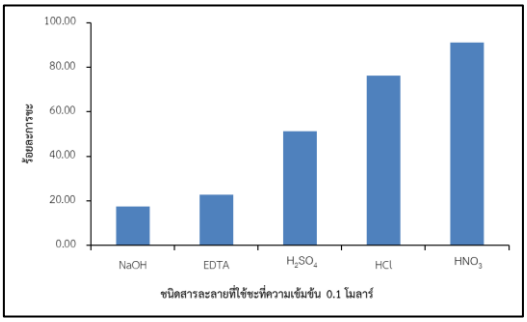
ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์		
q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2
2.86	1.8149	0.9930
ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช		
1/n	K_f (mg/g)	R^2
5.5371	1.7795	0.9642

3.3 ผลการศึกษาการชะโคบอลต์(II) จากอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่เคลือบด้วยอะกาโรส

3.3.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะ

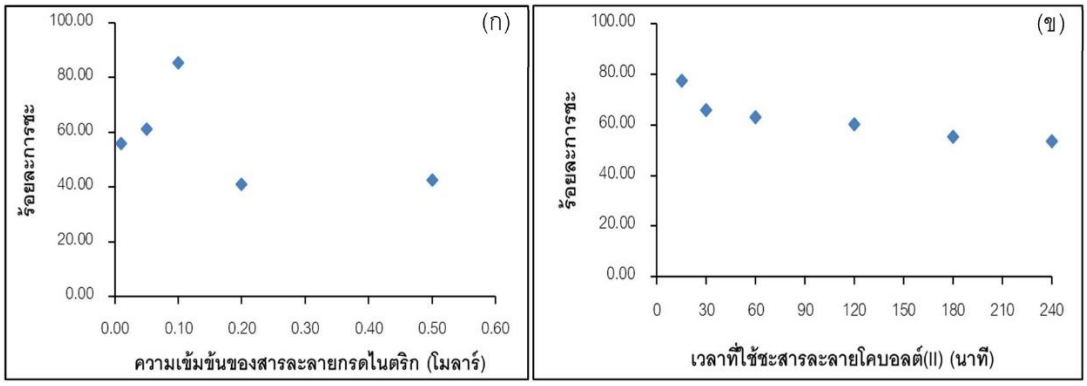
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะโคบอลต์(II) จากอนุภาคแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น เริ่มจากศึกษาชนิดตัวชะ ซึ่งในการทดลองนี้ศึกษาชนิดของตัวชะทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เอธิลลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (EDTA) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO_3) ผลการศึกษาพบว่าตัวชะที่แตกต่างกันสามารถชะโคบอลต์(II) ออกจากอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสแตกต่างกัน จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าสารละลายที่มีสมบัติเป็นกรด (H_2SO_4, HCl และ HNO_3) นั้นจะมีประสิทธิภาพในการชะได้ดีกว่าสารละลายเบส (NaOH) และสารคีเลต (chelating agent ซึ่งในที่นี้ คือ EDTA) ทั้งนี้เพราะ H^+ ที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถเข้าไปแทนที่โคบอลต์(II) ที่ดูดซับอยู่บนอนุภาคดีกว่า [36] และเมื่อพิจารณาชนิดของสารละลายกรดพบว่ากรดไนตริกมีประสิทธิภาพในการชะสูงสุด คือ ร้อยละ 91 (ดังรูปที่ 8) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโคบอลต์(II) (soft acid) สามารถจับกับไนเตรท (NO_3^-) ดีกว่าไอออนชนิดอื่น ตามลำดับความแรงของเบสดังนี้ $Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี “Hard Soft Acid Base” [37] ดังนั้นใน

การศึกษานี้จึงเลือกกรดไนตริกเป็นตัวชะที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวชะในการทดลองนี้



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการชะและชนิดสารละลายที่ใช้ในการชะ (เข้มข้น 0.1 โมลาร์)

เมื่อศึกษาความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกที่ต่างกัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการชะโคบอลต์(II) ออกจากอนุภาคได้แตกต่างกัน ดังรูป 9ก ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกเพิ่มมากขึ้น ร้อยละประสิทธิภาพการชะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (0.01-0.10 โมลาร์) แต่หลังจากนั้น (0.20-0.50 โมลาร์) พบว่าร้อยละประสิทธิภาพการชะมีแนวโน้มลดต่ำลง ทั้งนี้อาจเกิดจาก H^+ ของสารละลายกรดไนตริกมีจำนวนมากจนบดบังกันเอง ทำให้ไม่สามารถเข้าไปจับกับ O^- ของอะกาโรส ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ใช้ในการดูดซับโคบอลต์(II) ที่ 0.10 โมลาร์ เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ส่วนการศึกษาระยะเวลาในการชะโคบอลต์(II) ผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการชะเพิ่มขึ้น (15-240 นาที) ประสิทธิภาพการดูดซับค่อยๆลดลง ดังรูป 9ข ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกเวลาที่ใช้ในการชะโคบอลต์(II) ที่ 15 นาที เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละประสิทธิภาพการชะ (ก) ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก และ (ข) เวลาที่ใช้ชะสารละลายโคบอลต์(II)

4. สรุป

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์และการเคลือบอะกาโรสบนอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ คือ ที่ความเข้มข้นของอะกาโรส 1.00 %w/v ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.00 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลาย span 80 4.00 %v/v เวลาการเขย่าสารในช่วงการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 25 นาที ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโคบอลต์(II) คือ ที่พีเอชสารละลายเท่ากับ 6 และเวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 120 นาที นอกจากนี้ยัง

พบว่าการดูดซับโคบอลต์(II) ของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรส สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2.93 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าคงที่ในการดูดซับเท่ากับ 1.6063 ลิตรต่อมิลลิกรัม และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะโคบอลต์(II) ได้แก่ ชนิดของตัวชะ คือ สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์ และเวลาที่ใช้ในการชะเท่ากับ 15 นาที โดยจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบอะกาโรสมีศักยภาพที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับดูดซับโคบอลต์(II) ในระบบบำบัดน้ำเสียได้

5. กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ 2559 และ 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 60/2559, 233/2561 ทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสำหรับนิสิตระดับปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีการศึกษา 2559 และทุนสนับสนุนโครงงานวิจัยสำหรับนิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีการศึกษา 2558

6. รายการอ้างอิง

[1] Amiri, S., Mehrnia, M.R. and Roudsari, F.P., 2017, Enhancing purification efficiency of affinity functionalized composite agarose micro beads using Fe_3O_4 nanoparticles, J. Chromatogr. B. 1041: 27-36.

[2] Luo, F., Chen, Z., Megharaj, M. and Naidu, R. , 2016, Simultaneous removal of trichloroethylene and hexavalent chromium by green synthesized agarose-Fe nanoparticles hydrogel, Chem. Eng. J. 294: 290-297.

[3] Tahmasebi, E., Yamini, Y., Moradi, M. and Esrafili, A., 2013, Polythiophene- coated Fe_3O_4 superparamagnetic nanocomposite: Synthesis and application as a new sorbent for solid- phase extraction, Anal. Chim. Acta. 770: 68-74.

[4] Gao, Y., Wang, G., Huang, H., Hu, J., Shah, S. M. and Su, X., 2011, Fluorometric method for the determination of hydrogen peroxide and glucose with Fe_3O_4 as catalyst, Talanta 85: 1075-1080.

[5] Zhang, X., Cai, W., Hao, L., Feng, S., Lin, Q. and Jiang, W. , 2017, Preparation of Fe_3O_4/ reduced graphene oxide nanocomposites with good dispersibility for delivery of paclitaxel, J. Nanomater. 2017: 10.

[6] Song, X., Luo, X., Zhang, Q., Zhu A., Ji, L. and Yan, C., 2015, Preparation and characterization of biofunctionalized chitosan/ Fe_3O_4 magnetic nanoparticles for application in liver magnetic resonance imaging, J. Magnetism Magnetic Mater. 388: 116-122.

[7] Zhu, H., Tao, J., Wang, W., Zhou, Z., Li, P., Li, Z., Yan, K., Wu, S., Yeung, K.W.K., Xu, Z., Xu, H. and Chu, P.K., 2013, Magnetic, fluorescent, and thermos-responsive Fe_3O_4/rare earth incorporated poly

(St-NIPAM) core shell colloidal nano particles in multimodal optical/magnetic resonance imaging probes, Biomaterials 34: 2296-2306.

[8] Lin, Z., Zhang, Z., Li, Y. and Deng, Y., 2016, Magnetic nano-Fe_3O_4 stabilized Pickering emulsion liquid membrane for selective extraction and separation, Chem. Eng. J. 288: 205-311.

[9] Zhang, X. and Wang, J., 2018, Preparation of carbon coated Fe_3O_4 nanoparticles for magnetic separation of uranium, Solid State Sci. 75: 14-20.

[10] Singha, K.K., Senapatib, K.K. and Sarma, K. C. , 2017, Synthesis of superpara magnetic Fe_3O_4 nanoparticles coated with green tea polyphenols and their use for removal of dye pollutant from aqueous, J. Environ. Chem. Eng. 5: 2214-2221.

[11] Liang, H., Niu, H., Li, P., Tao, Z., Mao, C., Song, J. and Zhang, S. , 2013, Multifunctional Fe_3O_4@C@Ag hybrid nano particles: Aqueous solution preparation, characterization and photocatalytic activity, Mater. Res. Bull. 48: 2415-2419.

[12] Chai, L., Wang, Y., Zhao, N., Yang, W. and You, X., 2013, Sulfate-doped Fe_3O_4/Al_2O_3 nanoparticles as a novel adsorbent for fluoride removal from drinking water, Water Res. 47: 4040-4049.

[13] Saini, J., Garg, V.K. and Gupta, R.K., 2018, Removal of Methylene Blue from aqueous solution by Fe_3O_4@Ag/SiO_2 nanospheres: Synthesis, characterization and adsorption performance, J. Mol. Liquids 250: 413-422.

[14] Singhal, P., Jha, S.K. Pandey, S.P. and Neogy, S. , 2017, Rapid extraction of uranium from sea water using Fe_3O_4 and humic acid coated Fe_3O_4 nanoparticles, J. Hazard. Mater. 335: 152-161.

[15] Qin, W., Li, J., Tu, J., Yang, H., Chen, Q. and Liu, H. , 2017, Fabrication of porous chitosan membranes composed of nanofibers by low temperature thermally induced phase separation, and their adsorption behavior for Cu^{2+}, Carbohydr. Polym. 178: 338-346.

[16] Hui, B. , Zhang, Y. and Ye, L., 2015, Structure of PVA/gelatin hydrogel beads and adsorption mechanism for advanced Pb(II) removal, J. Indust. Eng. Chem. 21: 868-876.

[17] Jiang, Y., Liu, B., Xu, J., Pan, K., Hou, H., Hu, J. and Yang, J., 2018, Cross-linked chitosan/ β - cyclodextrin composite for selective removal of methyl orange: Adsorption performance and mechanism, Carbohydr. Polym. 182: 106-114.

[18] Salih, S. S. and Ghosh, T. K. , 2018, Adsorption of Zn(II) ions by chitosan coated diatomaceous earth, Int. J. Biol. Macromol. 106: 602-610.

[19] Pal, P., Syed, S.S. and Banat, F., 2017, Gelatin-bentonite composite as reusable adsorbent for the removal of lead from

aqueous solutions: Kinetic and equilibrium studies, J. Water Proc. Eng. 20: 40-50.

[20] Hayeeye, F., Sattar, M., Chinpa, W. and Sirichote, O. , 2017, Kinetics and thermodynamics of rhodamine B adsorption by gelatin/ activated carbon composite beads, Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 513: 259-266.

[21] Tripathi, A., Savio, J., Stanislaus, M. and D'Souza, F., 2013, Uranium(VI) recovery from aqueous medium using novel floating macroporous alginate-agarose-magnetite cryobeads, J. Hazard. Mater. 246-247: 87-95.

[22] Edenborn, H.M., Howard, B.H., Sams, J.I., Vesper, D. J. and Edenborn, S. L., 2017, Passive detection of Pb in water using rock phosphate agarose beads, J. Hazard. Mater. 336: 240-248.

[23] Abolghasemi, M. and Mir, P. H. , 2006, Preparation of a novel optical sensor for low pH values using agarose membranes as support, Sens. Actuator B Chem. 115: 49-53.

[24] Poursheikhi, N., Hashemi, P., Safdarian, M., Serenjeh, F. N. and Hesami, H. , 2016, Agarose based magnetic solid- phase extraction- magnetic field agitation for determination of trace amounts of molybdenum in beans, J. Braz. Chem. Soc. 27: 1678-4790.

[25] Hashemi, P. , Boroumand, J. and Reza Fat' hi, M., 2004, A dual column system using agarose-based adsorbents for pre concentration and speciation of chromium in water, Talanta 64: 578-583.

[26] Berger, P., Adelman, N.B., Beckman, K.J., Campbell, D.J., Ellis, A.B. and Lisensky, G.C., 1999, Preparation and properties of an aqueous ferrofluid, J. Chem. Edu. 76: 943-948.

[27] ชลธิชา ทองธรรมชาติ, 2557, การกำจัดโครเมียม (VI)ในน้ำทิ้งห้องปฏิบัติการด้วยอนุภาคนาโนแมกนีไทต์เคลือบด้วยอะกาโรสพอลิเมอร์, ภาคนิพนธ์ปริญญาโท, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, 39 น.

[28] Safdarian, M., Hashemi, P. and Adeli, M., 2013, One- step synthesis of agarose coated magnetic nanoparticles and their application in the solid phase extraction of Pd(II) using a new magnetic field agitation device, Anal. Chim. Acta. 774: 44-50.

[29] Pornpetpaiboon, S., Lobthaisong, A. and Muncharoen, S., 2016, Development of a cobalt(II) analysis method in laboratory wastewaters using UV-Vis spectro photometry, p. 259-267, Proceeding of the 5th Burapha University International Conference, Chonburi.

[30] Mohammadi, A. and Barikani, M., 2014, Synthesis and characterization of superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles coated with thiodiglycol, Mater. Character. 90: 88-93.

[31] Li, J., Guo, Z., Zhang, S. and Wang, X., 2011, Enrich and seal radionuclides in magnetic agarose microspheres, Chem. Eng. J. 172: 892-897.

[32] Hu, Z., Hong, P., Liao, M., Kong, S., Huang, N., Ou, C. and Li, S., 2016, Preparation and characterization of chitosan- agarose composite films, Materials 9: 816-825.

[33] Yu, S., Zhai, L., Qiu, Y., Cheng, L. and Ren, X., 2016, Synthesis and structural characterization of magnetite/sepiolite composite and its sorptive properties for Co(II) and Cd(II), J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 59: 221-228.

[34] Wang, Q., Li, J., Chen, C., Ren, X., Hu, J. and Wang, X., 2011, Removal of cobalt from aqueous solution by magnetic multiwalled carbon nanotube/iron oxide composites, Chem. Eng. J. 174: 126-133.

[35] Liu, B., Ge, N., Peng, B. and Pan, S., 2018, Kinetic and isotherm studies on the adsorption of tenuazonic acid from fruit juice using inactivated LAB, Journal of Food Engineering. 224: 45-52.

[36] Tripathi, A., Melo, J.S. and D'Souza, S.F., 2013, Uranium(VI) recovery from aqueous medium using novel floating macroporous alginate-agarose-magnetite cryobeads, J. Hazard. Mater. 246-247: 87-95.

[37] Petrucci, R.P., Herring, F.G., Madura, J.D. and Bissonnette, C., 2011, General Chemistry: Principles and Modern Apllications, 10th Ed., Person Canada, Inc., Toronto.