



ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนซ์และการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับแม่เหล็กบน  
เจลคอนเดนส์แทนนิน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์และการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ  
แม่เหล็กบนเจลคอนเดนส์แทนนิน



โดย  
นางสาวสุพรรณษา คณา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECTIVENESS IN REMOVING HEXAVALENT CHROMIUM AND REUSABILITY OF  
MAGNETIC ADSORBENTS BASED ON CONDENSED TANNIN GEL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)  
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2017  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University



58311311 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : โครเมียมเฮกซาเวเลนซ์, ตัวดูดซับแม่เหล็ก, เจลคอนเดนส์แทนนิน

นางสาว สุพรรณษา คณา: ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาเวเลนซ์และการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับแม่เหล็กบนเจลคอนเดนส์แทนนิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภวรรณ รัตสุข

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาเวเลนซ์ออกจากสารละลายโดยใช้เจลคอนเดนส์แทนนินที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเป็นตัวดูดซับ ความเป็นแม่เหล็กของเจลเกิดจากการเติมสารแม่เหล็กคือ เหล็กออกไซด์ แมงกานีสเฟอร์ไรท์ หรือโคบอลต์เฟอร์ไรท์ลงในโครงร่างของเจล การเพิ่มคุณสมบัติด้านแม่เหล็กจะช่วยให้แยกเจลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้สะดวก ในการศึกษาวิจัยที่ทดสอบ ได้แก่ ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ พีเอชของสารละลายที่เจลสามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาเวเลนซ์ได้ดีที่สุด โดยทดสอบที่พีเอช 1.0 3.0 5.0 7.0 และประสิทธิภาพของเจลที่นำกลับมาใช้ซ้ำ ผลการศึกษาพบว่าการดูดซับมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 120 นาที เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กทุกชนิด สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาเวเลนซ์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายพีเอช 1.0 ได้มากกว่า 98% โดยเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดได้สูงสุดถึง 99.46% ขณะที่เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับแมงกานีสเฟอร์ไรท์ และโคบอลต์เฟอร์ไรท์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 98.21% และ 98.38% ตามลำดับ ประสิทธิภาพดังกล่าวของเจลทุกชนิดจะลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดในสารละลายพีเอช 7.0 การแยกเจลออกจากสารละลายเมื่อสิ้นสุดการดูดซับสามารถทำได้ง่ายโดยใช้แม่เหล็กธรรมดา หลังจากล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์และน้ำปราศจากไอออน เจลที่แยกออกมาสามารถนำไปใช้ใหม่ได้ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาเวเลนซ์เมื่อนำไปทดสอบดูดซับซ้ำถึง 5 รอบ ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (แอลฟาเท่ากับ 0.05) ยกเว้นเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ดังนั้นการผนวกสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์และแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ลงในเจลคอนเดนส์แทนนิน ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำเจลคอนเดนส์แทนนินกลับมาใช้ซ้ำได้ไม่น้อยกว่า 5 รอบ โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาเวเลนซ์ลดลง

58311311 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : Hexavalent chromium, Magnetic adsorbents, Condensed tannin gel

MISS SUPHANSA KANA : EFFECTIVENESS IN REMOVING HEXAVALENT CHROMIUM AND REUSABILITY OF MAGNETIC ADSORBENTS BASED ON CONDENSED TANNIN GEL THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DOCTOR NOPAWAN RATTASUK

The objective of this research was to investigate the efficiency of hexavalent chromium (Cr(VI)) removal from the solution using condensed tannin gel (CT) which has a magnetic property, as the adsorbent. Magnetism of the CT was achieved by the incorporation of magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), manganese ferrite ( $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ), or cobalt ferrite ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) into the gel's matrix. The added magnetic property was intended to ease the separation of the gel for reuse. The tested variables in the study included the adsorption equilibrium time and pH of the solution at which hexavalent chromium removal by the magnetic condensed tannin gel (MTG) reached the maximum. The studied pHs were 1.0 3.0 5.0 and 7.0. The Cr(VI) removal efficiency of the reused MTG was also investigated. Results showed that the adsorption reached an equilibrium in 120 minutes. All MTGs were able to remove more than 98 % of 1,000 mg/L Cr(VI) when the solution has the pH of 1.0. The removal efficiency of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MTG was as high as 99.46%, whereas those of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ -MTG and  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ -MTG were 98.21% and 98.38%, respectively. The removal efficiency of all MTGs was decreased as pH of the solution increased. The lowest was at pH 7.0. Separation of the MTGs after the adsorption was easily done by using a simple magnet. After rinsing with 1M HCl and DI, the separated MTGs were ready for reuse. Except for  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ -MTG, other gels can be repeatedly used for 5 adsorption cycles with no statistically significant change in Cr(VI) removal efficiency ( $\alpha=0.05$ ). Therefore, the addition of magnetic materials,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ , helped increase the ability to reuse CT at least for 5 cycles with no Cr(VI) removal efficiency compromised.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภวรรณ รัตสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง และอาจารย์ ดร. ยศกิต เรืองทวีป ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการวิจัยอันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ชาวหลักสูตรทุกคนที่ ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดมา

คุณค่าหรือประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาแต่พระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ที่อบรมสั่งสอน แนะนำ ให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านและให้กำลังใจอย่างดียิ่ง แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุพรรณษา คณา



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 การดูดซับ.....	4
2.2 แทนนิน.....	5
2.3 สารแม่เหล็ก.....	7
2.4 โครเมียม.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 แผนการศึกษา.....	26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	27
3.3 การสกัดคอนเดนส์แทนนินจากสีเสียดเทศ.....	27



3.4 การสังเคราะห์สารแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	28
3.5 การเตรียมตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนนิน .....	29
3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนซ์และการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบน เจลคอนเดนส์แทนนินมาใช้ใหม่.....	29
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล .....	32
4.1 ผลการศึกษา .....	32
4.2 อภิปรายผลการศึกษา .....	44
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ .....	47
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	48
รายการอ้างอิง.....	49
ประวัติผู้เขียน .....	58



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เจลแทนนินชนิดต่างๆ ที่ใช้ดูดซับโลหะ.....	16
ตารางที่ 2 ประยุกต์ใช้ตัวดูดซับแม่เหล็ก.....	24



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างของแทนนิน.....	6
รูปที่ 2 ชนิดของแทนนิน.....	6
รูปที่ 3 โครงสร้างลูกบาศก์สปินเนล (Cubic spinel).....	9
รูปที่ 4 กลไกการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนิน.....	14
รูปที่ 5 โครงสร้างของปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์กับหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกัน (Catechol) ภายในเจลคอนเดนส์แทนนิน; ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกันกับ $\text{HCrO}_4^-$ .....	15
รูปที่ 6 โครงสร้างของปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์กับหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกัน (Catechol) ภายในเจลคอนเดนส์แทนนิน; การเชื่อมกันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกันกับ $\text{CrO}_2^{2+}$ .....	15
รูปที่ 7 การกำจัดสีของ RhB ด้วย $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{CA}$ ภายใต้แสงขาววัสดุไตรฟังก์ชันสามารถแยกออกด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกได้.....	18
รูปที่ 8 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาการเคลือบ APTS {3-aminopropyltriethoxysilane $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ } ด้วยอนุภาคแม่เหล็กซิลิกา.....	20
รูปที่ 9 วิธีการสังเคราะห์ Silica coated magnetic nanoparticles ที่ปรับปรุงด้วย Schiff base (L) และลักษณะการนำแม่เหล็กแยกออกจากสารละลาย.....	20
รูปที่ 10 ภาพถ่าย $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ aerogel.....	21
รูปที่ 11 ปฏิกิริยาการเกิดหมู่ฟังก์ชันของ (3-aminopropyl)-trimethoxysilane (APTMS) และพื้นผิวอนุภาคนาโน (NP).....	22
รูปที่ 12 การกำจัดน้ำมันที่รั่วไหลบนผิวน้ำด้วย M-CNT sponges ภายใต้สนามแม่เหล็ก.....	23
รูปที่ 13 การใช้และการรีไซเคิล M-CNT sponges ที่ใช้สำหรับการดูดซับน้ำมันที่รั่วไหล.....	23
รูปที่ 14 แผนผังการทดลอง.....	26
รูปที่ 15 ภาพถ่าย SEM ของเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).....	32
รูปที่ 16 สเปกตรัม EDX ของเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).....	33

รูปที่ 17 องค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_3O_4$ ).....	33
รูปที่ 18 ภาพถ่าย SEM ของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ( $MnFe_2O_4$ ).....	34
รูปที่ 19 สเปกตรัม EDX ของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ( $MnFe_2O_4$ ).....	34
รูปที่ 20 องค์ประกอบของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ( $MnFe_2O_4$ ).....	35
รูปที่ 21 ภาพถ่าย SEM ของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ( $CoFe_2O_4$ ).....	35
รูปที่ 22 สเปกตรัม EDX ของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ( $CoFe_2O_4$ ).....	36
รูปที่ 23 องค์ประกอบของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ( $CoFe_2O_4$ ).....	36
รูปที่ 24 ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที่ ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์.....	37
รูปที่ 25 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที่ ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์.....	38
รูปที่ 26 ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที่ ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์.....	39
รูปที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที่ ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์.....	39
รูปที่ 28 ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที่ ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์.....	40
รูปที่ 29 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที่ ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์.....	41
รูปที่ 30 การแยกตัวดูดซับออกจากสารละลายโดยใช้แม่เหล็ก.....	41
รูปที่ 31 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ของเจลที่ผนวก กับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์ซึ่งนำมาใช้ซ้ำ.....	42
รูปที่ 32 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ของเจลที่ผนวก กับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์ซึ่งนำมาใช้ซ้ำ.....	43
รูปที่ 33 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ของเจลที่ผนวก กับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์ซึ่งนำมาใช้ซ้ำ.....	44

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมหลายประเภทมีการใช้โลหะในกระบวนการผลิต โครเมียมและสารประกอบโครเมียมก็เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการชุบโลหะ ผลิตภัณฑ์ส่วนรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ ชุบเครื่องประดับ การย้อมผ้า การฟอกหนังสัตว์ และอื่นๆ โครเมียมและสารประกอบ โครเมียมมีหลายกลุ่มโดยแบ่งตามวาเลนซ์ ได้แก่ 0 1 2 3 4 และ 6 โดยโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Hexavalent chromium) เป็นกลุ่มที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมมากที่สุด การใช้โลหะต่างๆ รวมทั้งโครเมียมทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะในน้ำทิ้ง การแยกโลหะกลับคืนส่วนใหญ่ทำด้วยวิธีการที่ต้องใช้สารเคมีที่ยุ่งยากหรือต้องใช้เครื่องมือที่มีต้นทุนสูง หลายๆ อุตสาหกรรมจึงละเลยที่จะแยกโลหะกลับคืนจากน้ำทิ้ง ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเกิดปัญหาสุขภาพตามมา (จิระฉัตร ศรีแสน, ม.ป.ป.; ประกร รามกุล, 2553)

ปัจจุบันความเข้มข้นของโครเมียมที่พบในดินและน้ำใต้ดินหลายแหล่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน โดยพบในรูปแบบโครเมียมไตรวาเลนซ์และเฮกซะวาเลนซ์ จึงสร้างความวิตกกังวลที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ มีความเป็นพิษสูงมาก เป็นสารก่อมะเร็งและทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ ในปัจจุบันมีการใช้วิธีการและเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ได้กับการแยกสารมลพิษ รวมทั้งโลหะออกจากน้ำ การดูดซับ (Sorption) คือปรากฏการณ์ที่เกิดความสมดุลในการแยกสารประกอบประเภทไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ไปยังพื้นผิวของระบบสองสถานะ (Two - Phase System) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลว โดยเทคนิคนี้มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้พลังงานน้อย และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูก นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว บางชนิดสามารถทำความสะอาด และนำกลับมาใช้ (Regenerate) ในระบบใหม่ได้ ปัจจุบันในเชิงพาณิชย์มีการใช้ตัวดูดซับทั้งที่ได้จากธรรมชาติ และตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น (พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, 2553)

ในอุตสาหกรรมบางอย่าง เช่น การชุบด้วยไฟฟ้า การย้อมสิ่งทอ และการตกแต่งโลหะ เดิมมีการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ด้วยวิธีการตกตะกอนในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์หรือ

การแลกเปลี่ยนไอออน แต่ไม่ได้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจเนื่องจากมีข้อเสีย คือ เกิดกากตะกอนที่ต้องนำไปบำบัดต่อปริมาณมากและการทำให้สารละลายที่เป็นกรดมีสถานะเป็นกลาง ส่วนวิธีอื่นๆ เช่น การกรองด้วยเยื่อเมมเบรนก็มีปัญหาเรื่องความไม่แน่นอนของเยื่อเลือกผ่านไอออน (Ion exchange membrane) เนื่องจากประสิทธิภาพการออกซิเดชันของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ (Nakano, Takeshita, & Tsutsumi, 2001)

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ทำให้ปัจจุบันมีการพัฒนาการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่ปนเปื้อนในธรรมชาติ โดยมุ่งเน้นวิธีการบำบัดที่ลดต้นทุน โดยใช้วัสดุที่หาง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และหนึ่งในวิธีการบำบัดที่นักวิจัยให้ความสนใจคือการใช้ตัวดูดซับ (Adsorbents) มีทั้งแบบที่สังเคราะห์ขึ้น และที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ วิธีดังกล่าวมีต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ เจลคอนเดนส์แทนนินจัดเป็นวัสดุจากธรรมชาติชนิดหนึ่งที่กำลังกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาประสิทธิภาพของเจลคอนเดนส์แทนนินจากไม้ตระกูล Mimosa เจลดังกล่าวสามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้สูงถึง 100% ในระยะเวลาเพียง 40 นาทีเท่านั้น จึงจัดเจลนี้เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับนำมาพัฒนา โดยการผนวกสารแม่เหล็กเข้าไป เพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้งานของเจลคอนเดนส์แทนนินในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ โดยเพิ่มคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้สะดวก

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายหลักที่จะศึกษาการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายด้วยตัวดูดซับแม่เหล็ก 3 ชนิดคือ เหล็กออกไซด์ แมงกานีสเฟอร์ไรท์ และโคบอลต์เฟอร์ไรท์ที่ตรึงไว้บนเจลคอนเดนส์แทนนิน โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยที่จะนำไปสู่เป้าหมายหลักดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์
- 2) ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์และพีเอชที่สารแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงไว้บนคอนเดนส์แทนนินกลับมาใช้ใหม่
- 4) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงไว้บนเจลคอนเดนส์แทนนิน

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในสารละลายด้วยตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงไว้บนเจลคอนเดนส์แทนนิน โดยใช้คอนเดนส์แทนนินจากสีเขียวเทศและมีการเติมสารแม่เหล็ก 3 ชนิดลงบนเจลคอนเดนส์แทนนิน คือ เหล็กออกไซด์ แมงกานีสเฟอร์ไรท์ และโคบอลต์เฟอร์ไรท์ โดยมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

- 1) ศึกษาการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ที่ไม่ปรับพีเอช
- 3) ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์และสารแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยพีเอชที่ศึกษาคือ 1.0 3.0 5.0 และ 7.0 ในระยะเวลาที่เหมาะสม
- 4) ศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงไว้บนเจลคอนเดนส์แทนนินกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบที่สภาวะพีเอชและระยะเวลาที่เหมาะสม

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ สามารถแยกออกจากตัวกลางหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการดูดซับได้ง่ายและนำกลับมาใช้ซ้ำได้



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 การดูดซับ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสารมลพิษจำนวนมาก สารมลพิษเหล่านี้หากไม่ได้รับการบำบัดที่ถูกต้อง อาจจะไปปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และสามารถย้อนกลับเข้าสู่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ได้ ในการบำบัดสารอันตรายในน้ำเสียนั้น การดูดซับ (Sorption) เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้แยกสารอันตรายออกไปได้ เทคนิคนี้มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้พลังงานน้อย และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาไม่แพง นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว บางชนิดสามารถทำความสะอาด และนำกลับมาใช้ในระบบใหม่ได้ ปัจจุบันมีการใช้งานตัวดูดซับทั้งที่ได้จากธรรมชาติ และตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นในเชิงพาณิชย์ (พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, 2553)

กระบวนการดูดซับใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทและมีการใช้มากขึ้น เนื่องจากประหยัดและมีประสิทธิภาพดีโดยเฉพาะในการกำจัดไอออนโลหะออกจากน้ำเสีย มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถั่วเหลือง ยาง ชีลื้อย กากตะกอน ถ้ำลอย รำข้าวสาลี วัสดุจากธรรมชาติ เป็นต้น (Pandey, Sharma, & Sambi, 2010)

ปัญหาสำคัญประการหนึ่ง ในการนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำคือการแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสีย ในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวดูดซับให้มีสารแม่เหล็กเพื่อให้ตัวดูดซับดังกล่าวแยกออกมาจากตัวกลางได้ง่ายโดยใช้แม่เหล็กดูดตัวดูดซับแยกออกมา (ตัวดูดซับดังกล่าวจะกล่าวถึงต่อไปในชื่อว่า “ตัวดูดซับแม่เหล็ก”) ตัวดูดซับแม่เหล็กที่ใช้กันทั่วไปมีหลายขนาด แต่ที่นิยมใช้กันคือขนาดไมโครและนาโน ซึ่งสารแม่เหล็กที่นิยมใช้ในการเคลือบตัวดูดซับ ได้แก่ โลหะเหล็ก (Zero valence iron) ออกไซด์ (Iron oxides) เฟอร์ไรท์ (Ferrites) โดยสารแม่เหล็กเหล่านี้สามารถเคลือบหรือฝังลงในตัวดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอน แกรฟีน ซิลิกา ซีโอไลต์หรือสารอินทรีย์ในกลุ่มสารโมเลกุลใหญ่ (Macromolecules) เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ พอลิเมอร์และสารชีวโมเลกุล ในปัจจุบันตัวดูดซับแม่เหล็กแบบไฮโดรเจล (Hydrogels) ซีโรเจล (Xerogels) และแอโรเจล (Aerogels) มีการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมและเภสัชวิทยาเพิ่มสูงขึ้น โดยในด้านสิ่งแวดล้อมมีการใช้ตัวดูดซับแม่เหล็กที่สร้างจาก

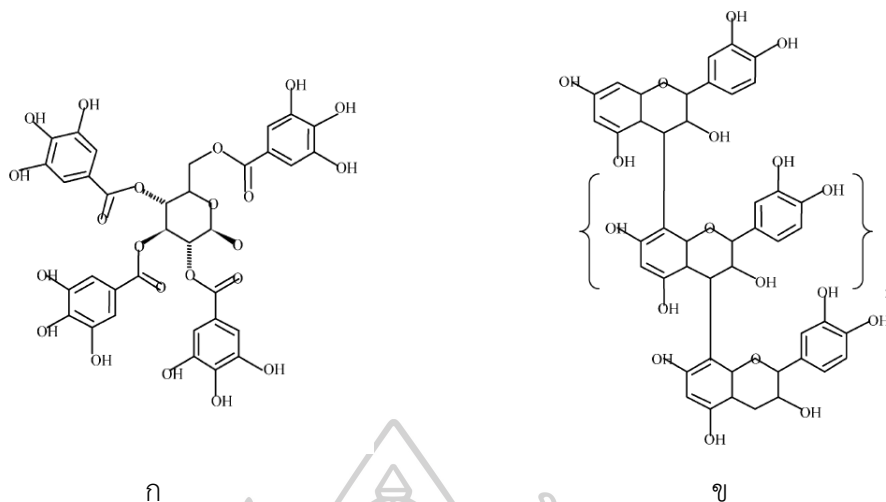


คาร์โบไฮเดรตและพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น แป้ง กรดแอลจินิก และโคโคซาน เพื่อช่วยในการรักษาความเสถียรของอนุภาคแม่เหล็กและใช้เป็นโครงสร้างส่วนที่ดูดซับสารที่ต้องการ มีการนำไปใช้กำจัดโลหะหนัก ดูดซับน้ำมัน สีย้อมและสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษ ในด้านเภสัชวิทยามีการใช้ตัวดูดซับแม่เหล็กเพื่อดูดซับสารชีวโมเลกุลและยา ปัจจุบันมีการพัฒนาให้ตัวดูดซับแม่เหล็กที่อยู่ในรูปเจลประเภทต่างๆ มีขนาดเล็กระดับนาโนเพื่อความสะดวกในการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

## 2.2 แทนนิน

คำว่า “แทนนิน” มาจากภาษาฝรั่งเศสที่เรียกว่า “Tanin” เป็นสารที่ใช้ในการฟอกหนังและเป็นสารโพลีฟีนอลที่มีอยู่ในธรรมชาติ ในสมัยโบราณใช้ฟอกหนังและให้สีน้ำตาลแก่ผิวของสัตว์ โดยเข้าใจกันว่าการฟอกหนังเป็นการเชื่อมคอลลาเจนของผิว เป็นการเติมช่องว่างระหว่างคอลลาเจนของหนัง มีการใช้แทนนินจากพืชแทนการฟอกหนังด้วยแร่ธาตุ เช่น สารส้มหรือโครเมียม ในธรรมชาติพบแทนนินได้ทั่วไปในวงศ์ของพืชชั้นสูง เช่น เกาลัด ไม้โอ๊ค เปลือกไม้ เป็นต้น

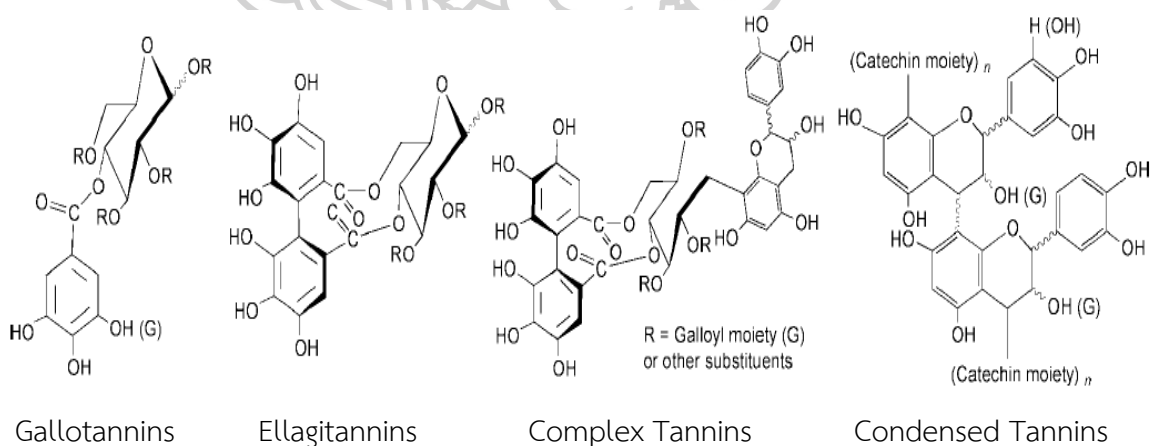
ในอุตสาหกรรมการย้อม แทนนินใช้เป็นตัวทำละลายสีย้อมที่มีประจุบวก และใช้ในการผลิตหมึก รวมไปถึงอุตสาหกรรมสิ่งทอ ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้แทนนินเพื่อทำให้ไวน์ เบียร์และน้ำผลไม้มีความใสขึ้นและยังเพิ่มปริมาณแอนติออกซิแดนท์ด้วย นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อทำให้ยางจับกันเป็นก้อน เนื่องจากแทนนินมีโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความหลากหลาย จึงมีการจำแนกอย่างเป็นระบบโดยใช้ลักษณะโครงสร้างที่มีความจำเพาะและสมบัติทางเคมีที่มีผลต่อการทำงาน และจากการศึกษาพบว่าแทนนินบางชนิดละลายน้ำได้ จึงจำแนกออกมาเป็น Hydrolysable tannins ตัวอย่างเช่น Gallotannins และ Ellagitannins กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ เช่น Oligomeric และ Polymeric proanthocyanidins ถูกจำแนกเป็น Condensed tannins ซึ่งมีโครงสร้างต่างกันดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของแทนนิน ก) *Hydrolysable tannin* ข) *Condensed tannin*

ที่มา: Krause, Smith, Brooker, & McSweeney (2005)

หากจำแนกให้ละเอียดลงไปโดยพิจารณาจากโครงสร้างพื้นฐานจะสามารถแบ่งแทนนินออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่คือ 1) Gallotannins 2) Ellagitannins 3) Complex tannins และ 4) Condensed tannins (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ชนิดของแทนนิน

ที่มา: Khanbabaee & van Ree (2001)

แทนนินสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลยื่นออกมาจากวงแหวนเบนซีนแต่ละวง (Krause et al., 2005)

## 2.3 สารแม่เหล็ก

### 2.3.1 เหล็กออกไซด์

เหล็กออกไซด์เป็นของแข็งที่มีไอออนบวกของโลหะและน้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งรวมถึงสารประกอบของโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกไซด์(-OH) ออกซิไฮดรอกไซด์(-OOH) และออกไซด์(-O) มีรูปแบบทางเคมี เช่น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Ferric hydroxide)  $\text{FeO}$  (Ferrous oxide)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Ferric oxide หรือ Hematite)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Ferrous ferric oxide หรือ Magnetite) และ  $\text{FeOOH}$  (Goethite) โดยการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (Sol-gel processing) ของสารละลายเกลือ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่สภาวะพีเอชสูง อุณหภูมิต่ำจะเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ในรูปแบบ  $\text{FeOOH}$  แต่ถ้าสภาวะพีเอชต่ำกว่า 4 และอุณหภูมิสูงจะเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ในรูปแบบ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ส่วน  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  จะเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือออกซิเดชันของ  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (Unob, Wongsiri, Phaeon, Puanggam, & Shiwatana, 2006)

อนุภาคของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดนาโน (Magnetic nanoparticle, MNPs) เป็นอนุภาคที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ในด้านทางการแพทย์ มีการนำอนุภาคนาโนแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมการปลดปล่อยและนำส่งยา หรือใช้ในเทคนิคการแยกสารชีวโมเลกุล อนุภาคของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดระดับนาโนจึงทำให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี (บุญยงช บัญไสย, อรรวรรณ สุขสมบัติ, และปิยะพร ณ หนองคาย, 2557)

### 2.3.2 แมงกานีสเฟอร์ไรท์

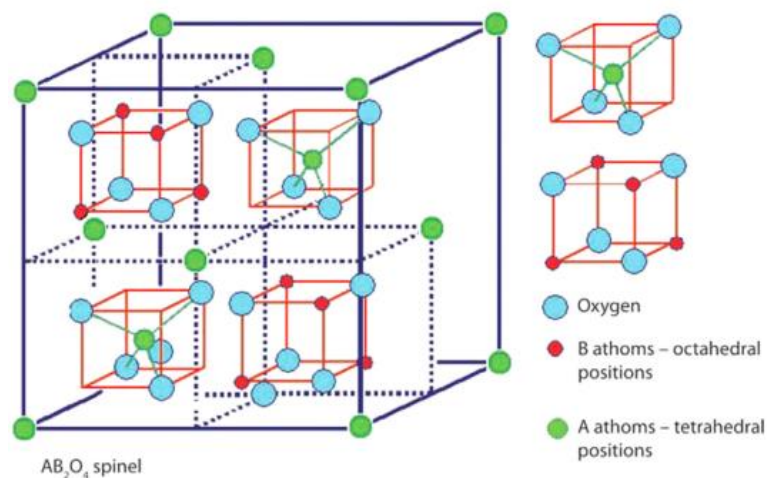
ผลึกแม่เหล็กขนาดนาโนและเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดนาโนได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งานในแกนหม้อแปลง อุปกรณ์บันทึกข้อมูล อุปกรณ์ความถี่สูง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ใช้เป็นหน่วยความจำแม่เหล็ก เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ โทรคมนาคม สื่อบันทึก การกำจัดสารพิษในน้ำและมีคุณสมบัติในการลดขนาดและเพิ่มพื้นที่ผิวจึงมีการใช้เฟอร์ไรท์ขนาดนาโนเป็นแม่เหล็กเหลว (Ferrofluid) ในเทคโนโลยีชีวการแพทย์ เช่น เป็นสาร MRI และเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น บรรดาวัสดุแม่เหล็กเหล่านี้เป็นเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดนาโนแบบสปีเนลในรูปแบบ  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  โดยที่ M คือ Mn Co Ni Zn Mg Fe เป็นต้น โดยผลึกเฟอร์ไรท์แบบสปีเนลจะมีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์ปิดที่มีประจุลบ ซึ่งจะมีโครงสร้างทั้ง 2 แบบคือ Tetrahedral และ Octahedral บางส่วนจะมีประจุบวกอยู่

แมงกานีสเฟอร์ไรท์สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid state reaction) การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้เองที่อุณหภูมิ (Self-propagating high temperature synthesis (SHS) reaction) ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) โซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) สังเคราะห์โมเลกุลที่ต้องการด้วยวิธีกล (Mechanosynthesis) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) และการเผา (Devi & Soibam, 2017; Lazarevic, Jovalekic, Milutinovic, Romcevic, & Romcevic, 2012)

### 2.3.3 โคบอลต์เฟอร์ไรท์

อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนได้รับความสนใจอย่างมากในศตวรรษที่ผ่านมา เพราะมีศักยภาพในการใช้งานเนื่องจากมีความหนาแน่นของแม่เหล็กสูง เป็นสนามแม่เหล็ก ใช้ในการเก็บข้อมูลและพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งใช้เป็นเซ็นเซอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา โคบอลต์เฟอร์ไรท์ก็เป็นอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่มีการศึกษากันอย่างมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในด้านความเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีความแข็งแรงเชิงกล มีสภาพทางแม่เหล็กเป็นลูกบาศก์สูง ด้วยสมบัตินี้จึงมีการประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วิทยุ เทปเสียง สื่อบันทึกข้อมูลดิจิทัล และแม่เหล็กเหลว

โคบอลต์เฟอร์ไรท์มีโครงสร้างที่สำคัญเป็นลูกบาศก์สปีเนล มี  $O^{2-}$  อยู่ในโครงสร้าง มี  $Co^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  อยู่ในรูปแบบ Tetrahedral หรือ Octahedral (รูปที่ 3) อนุภาคแม่เหล็กโคบอลต์เฟอร์ไรท์ขนาดนาโนโดยส่วนใหญ่มีความเสถียร ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างของอนุภาค และวิธีที่ใช้เตรียม การเตรียมโคบอลต์เฟอร์ไรท์มีหลายวิธีทั้งกระบวนการโซล-เจล การตกตะกอนร่วมทางเคมี ปฏิกิริยาการเผาไหม้ และการใช้แรงไฮโดรลิซิส อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้ไม่สามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากราคาสูง เกิดสารพิษ ขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อน ใช้อุณหภูมิสูง ระยะเวลาานาน และไม่เพียงแต่ส่งผลด้านการเกิดของเสียเท่านั้นยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมด้วย วิธีการตกตะกอนร่วมทางเคมีจึงเป็นวิธีที่มักใช้ในการสังเคราะห์ออกไซด์ของแม่เหล็ก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และควบคุมขนาดของอนุภาคได้ดี (Zi, Sun, Zhu, Yang, Dai & Song, 2009)



รูปที่ 3 โครงสร้างลูกบาศก์สปิเนล (Cubic spinel)

ที่มา: Houshiar, Zebhi, Razi, Alidoust, & Askari (2014)

## 2.4 โครเมียม

โครเมียมจัดเป็นโลหะและอนุพันธ์ของโลหะที่เป็นสารมลพิษ และรายงานว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์สามารถก่อมะเร็งได้ เนื่องจากก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดีเอ็นเอทั้งในสัตว์และมนุษย์ เป็นผลทำให้โครโมโซมเกิดการความผิดปกติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สีย้อม ซีเมนต์ ฟอกหนังและสีทาบ้าน ซึ่งอาจมีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์สูงถึงหลายร้อยมิลลิกรัมต่อลิตร ค่ามาตรฐานของปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในน้ำที่กำหนดไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรและในน้ำดื่มต้องต่ำกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทั่วไปมีหลายเทคนิคในการกำจัดโครเมียม เช่น การดูดซับ การตกตะกอนไฟฟ้าเคมี การกรองผ่านเมมเบรนแบบรีเวิร์สออสโมซิส เป็นต้น แต่เทคนิคเหล่านี้ไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมาก และส่วนใหญ่โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในธรรมชาติจะอยู่ในรูป  $\text{H}_2\text{CrO}_4$   $\text{HCrO}_4^-$   $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  และ  $\text{CrO}_4^{2-}$  ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนโดยใช้คาร์บอนและไฮดรอกไซด์ได้ (Pandey et al., 2010)

### 2.4.1 ประเภทของโครเมียม

โครเมียมและสารประกอบโครเมียมสามารถแบ่งออกเป็น

2.4.1.1 โลหะโครเมียมและอัลลอยด์ กลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) โดยทั่วไปกลุ่มนี้จะเป็นพิษต่อสุขภาพค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

2.4.1.2 สารประกอบไดวาเลนซ์โครเมียม ( $\text{Cr}^{2+}$ ) หรือ สารประกอบโครโมส ได้แก่ โครโมสคลอไรด์ ( $\text{CrCl}_2$ ) และ โครโมสซัลเฟต ( $\text{CrSO}_4$ ) กลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อยต่อสุขภาพของคน

2.4.1.3 สารประกอบไตรวาเลนซ์โครเมียม ( $\text{Cr}^{3+}$ ) หรือ สารประกอบโครมิก เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในขบวนการเมแทบอลิซึมของกลูโคส ส่วนสารประกอบอื่นๆ ที่พบในกลุ่มนี้ ได้แก่ โครมิกออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) โครมิกซัลเฟต ( $\text{Cr}_2[\text{SO}_4]_3$ ) โครมิกคลอไรด์ ( $\text{CrCl}_3$ ) โครมิกโพแทสเซียมซัลเฟต ( $\text{KCr}[\text{SO}_4]_2$ ) และแรโครไมท์ ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ )

2.4.1.4 สารประกอบเฮกซาวาเลนซ์โครเมียม ( $\text{Cr}^{6+}$ ) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

- กลุ่มที่ละลายน้ำได้ (Water-soluble hexavalent compounds) ได้แก่ กรดโครมิก แอนไฮดรัสของกรดโครมิก โมโนโครเมต ไดโครเมตของโซเดียม โพแทสเซียม แอมโมเนียม ซีเซียม รูบิเดียมและลิเทียม เป็นต้น
- กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (Water-insoluble hexavalent compounds) ได้แก่ ซิงค์โครเมต แคลเซียมโครเมต ตะกั่วโครเมต แบเรียมโครเมต สตรอนเทียมโครเมต และโครเมียมไดออกไซด์ เป็นต้น

## 2.4.2 แหล่งที่มาของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์

โครเมียมเฮกซาวาเลนซ์สามารถพบได้ในวัสดุหรือกิจกรรมดังนี้

- ผงสีโครเมตในสีย้อม สีหมึกพิมพ์และพลาสติก
- การเติมโครเมียมเป็นสารป้องกันการกัดกร่อน สีรองพื้นและพื้นผิวอื่นๆ
- การชุบโครเมียมโดยฉาบโลหะโครเมียมลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยใช้สารละลายกรดโครมิก
- อนุภาคที่ปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการถลุงแร่เหล็กโครเมียม
- ครันจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสารอลูมิเนียมโครเมียมอัลลอยด์
- ปนเปื้อนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

## 2.4.3 ผลกระทบต่อสุขภาพของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์

การสัมผัสกับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์อาจทำให้เกิดผลต่อสุขภาพต่อไปนี้

- ผู้ที่หายใจเอาอากาศที่มีโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เข้าไปจะเกิดโรคมะเร็งปอด
- โครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ เนื่องจากสามารถละลายน้ำได้ดี ผู้ที่สัมผัสกับ



โครเมียมเฮกซวาเลนซ์เป็นเวลานานกว่า 30 ปีขึ้นไป พบว่ามีความเสี่ยงสูงในการเกิดโรคมะเร็งและพบว่าเป็นโรคมะเร็งปอดมากกว่าโรคมะเร็งชนิดอื่น

- ถ้าหายใจเอาโครเมียมเฮกซวาเลนซ์เข้าไปในระดับสูง จะทำให้เกิดการระคายเคืองหรือเป็นอันตรายต่อจมูก คอและปอด (ทางเดินหายใจ)

- ถ้าสัมผัสโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ที่ความเข้มข้นสูง จะเกิดการระคายเคืองหรือความเสียหายต่อดวงตาและผิวหนัง บางรายมีอาการแพ้ทางผิวหนัง เกิดจากการสัมผัสของเหลวหรือของแข็งที่มีโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ เกิดเป็นผื่น บวมแดง คันเมื่อสัมผัสเป็นเวลานาน แผลจะหายช้าและเป็นรอยแผลเป็น

อาจรวมถึงอาการน้ำมูกไหล จาม ไอ คันและแสบร้อน การสัมผัสซ้ำหรือเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดแผลในจมูกและทำให้เกิดอาการเลือดคั่ง จนอาจเกิดความเสียหายรุนแรงต่อเยื่อบุโพรงจมูกจนเกิดผนังกันจมูกทะลุได้ ในรายที่มีอาการแพ้โครเมียมเฮกซวาเลนซ์ อาจทำให้เกิดอาการหอบหืด เช่น การหายใจเสียงดังและหายใจถี่ (จิระฉัตร ศรีแสน, ม.ป.ป.)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Owlad, Aroua, Daud, & Baroutian (2008) พบว่าการกำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซับ กระบวนการรีดักชัน การกรองแบบเยื่อเลือกผ่าน (Reverse osmosis) และการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น สำหรับกระบวนการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนซ์นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้มากกว่าวิธีอื่นๆ และมีตัวดูดซับที่ใช้งานหลายตัว เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่มีขายตามท้องตลาดหรือเตรียมจากวัสดุชีวภาพ Candela, Martinez, & Macia (1995) ทดสอบใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชีวภาพหลายชนิด ในการกำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนซ์และรายงานผลว่าขั้นตอนในการเตรียมพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีส่วนสำคัญต่อความสามารถในการกำจัด โครเมียมเฮกซวาเลนซ์ โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ให้ผลดีที่สุด และกล่าวไว้ว่าในกรณีที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 1 การกำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ ส่วนหนึ่งเกิดจากกระบวนการรีดักชันเปลี่ยนโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์โดยหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ได้ระบุไว้ ซึ่งมีอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ สอดคล้องกับรายงานของ Huang & Wu (1975) ที่กล่าวว่ากำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดเกิดขึ้นผ่าน 2 กระบวนการหลัก คือการดูดซับและรีดักชัน โดยการดูดซับจะ

เกิดขึ้นเป็นกระบวนการหลัก ในสารละลายที่มีพีเอช 5 - 6 ซึ่งต่างจากรายงานของ Sharma & Forster (1996) ซึ่งกล่าวว่าในการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์นั้น ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดจะอยู่ในช่วงที่สารละลายมีพีเอชประมาณ 2.5 - 3.0 นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ด้วยถ่านกัมมันต์แปรผันกับอุณหภูมิ คือการดูดซับ จะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Hamadi, Chen, Farid, & Lu, 2001) สำหรับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากกว่า ขนาดของพื้นผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์ (Park & Jung, 2001)

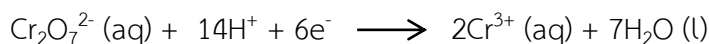
สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชีวภาพนั้น มีรายงานว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ จะขึ้นอยู่กับพีเอชและความเค็มของสารละลาย (Natale, Lancia, Molino, & Musmarra, 2007) รายงานของ Selomulya, Meeyoo, & Amal (1999) แสดงให้เห็นว่าแหล่งที่มาของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้นมีผลต่อคุณภาพของพื้นผิวของถ่านที่ได้ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมะพร้าวและฟืนของถ่านหิน จะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในรูปที่ถูก Protonated ขณะที่ถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจากไม้ชนิดอื่นๆ จะมีหมู่ไฮดรอกซิลในรูปที่ถูก Ionized ข้อแตกต่างนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหล่านี้แตกต่างกันออกไป โดยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากไม้สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ดีที่สุดในสารละลายพีเอช 2 ขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมะพร้าวและฟืนถ่านหินจะกำจัดได้ดีที่สุดในสารละลายพีเอช 3 - 4

ตัวดูดซับที่ทำมาจากชีวมวล เป็นอีกชนิดหนึ่งที่มีการค้นคว้าวิจัยกันอย่างกว้างขวาง เพราะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือราคาถูก ประหยัดค่าใช้จ่าย ลดการใช้สารเคมีและเพิ่มความเป็นไปได้ในการนำโลหะกลับคืนมา (Ahalya, Ramachandra, & Kanamadi, 2003) จึงเหมาะสมที่จะใช้กำจัดโลหะที่มีความเข้มข้นสูงๆ (Chaiyasith, Chaiyasith, & Septhu, 2006) มีรายงานว่า การดูดซับโดยชีวมวลนี้มีกลไกที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น การดูดซับทางเคมี (Complexation) การดูดซับและการตรึงบนพื้นผิว (Adsorption-complexation) และรูพรุน การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การตกตะกอนขนาดเล็ก (Microprecipitation) การเกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Heavy metal hydroxide condensation) และการดูดซับ (Gardea-Torresdey, de la Rosa, & Peralta-Videa, 2004; Volesky, 2001; Brown, Gill, & Allen, 2000) วัสดุชีวมวลที่มีการนำมาทดสอบดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ได้แก่ เปลือกถั่ว เศษผ้าขนสัตว์ เปลือกมะกอก ขี้เลื่อย ใบสน เปลือก

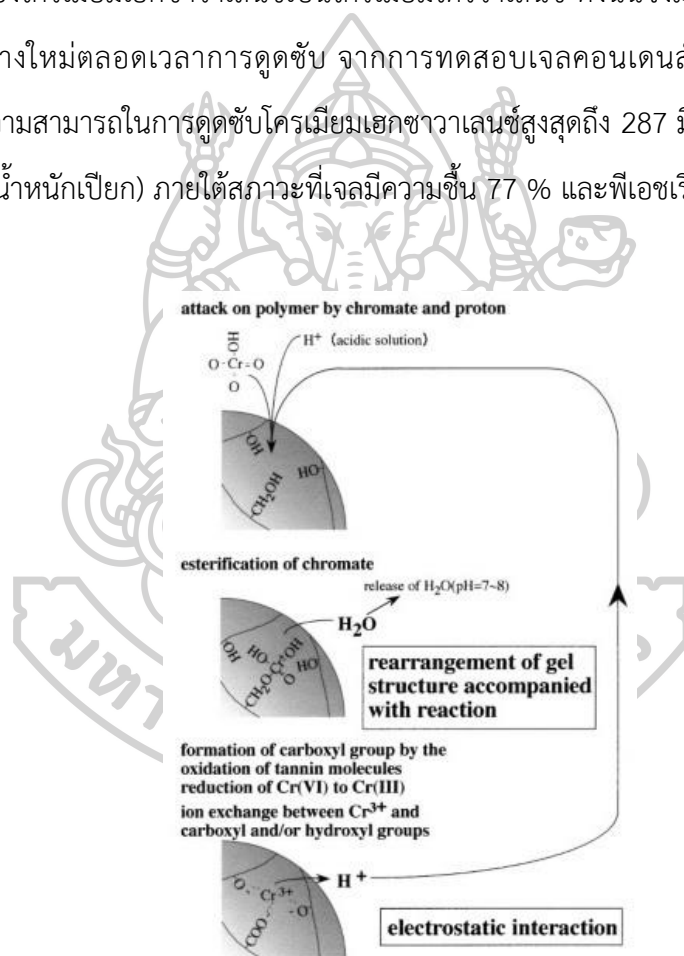


อัลมอนต์ และต้นตะบองเพชร เป็นต้น (Dakiky, Khamis, Manassra, & Mer'eb, 2002) ของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น เหล็กไฮดรอกไซด์ ซึ่งมาจากอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย ถูกนำมาใช้ทดสอบกำจัดสารมลพิษที่มีรูปแบบ Oxyanionic เช่น ฟอสเฟต และโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ออกจากสารละลาย มีรายงานว่า ของเสียจากอุตสาหกรรมชนิดนี้สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 5.6 ได้ถึง 0.47 มิลลิกรัมต่อกรัม (Namasivayam & Ranganathan, 1993) พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัด โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ของตัวดูดซับชนิดนี้จะขึ้นกับแอนไอออนชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ในสารละลายด้วย Aoki & Munemori (1982) รายงานว่าการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ด้วยเหล็กไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 8.5 ในกรณีที่มีซัลเฟตและแอนไอออนชนิดอื่นๆ ในสารละลาย โดยแอนไอออนเหล่านี้จะเข้ามาแย่งพื้นที่ดูดซับบนพื้นผิวของเหล็ก ผงตะกอนเหล็ก (Furnace slag) จากเตาเผาเหล็ก เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาทดสอบ โดยมีรายงานว่าสามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ได้สูงถึง 7.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (Srivastava, Pant, & Pal, 1987) นอกจากนี้เถ้าลอย (Fly ash) จากอุปกรณ์กำจัดมลภาวะทางอากาศของโรงงานน้ำตาล ก็เคยถูกนำมาใช้ทดสอบกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง พบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสูงที่สุดถึง 260 มิลลิกรัมต่อกรัม (Gupta, Morhan, Sharma, & Park, 1999) มีรายงานว่าของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตอลูมิเนียมซึ่งเรียกว่า “Red mud” ซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกา อะลูมินา เหล็ก และไทเทเนียมออกไซด์ ก็สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 5.2 ได้สูงถึง 1.6 มิลลิกรัมต่อกรัม (Pradhan, Das, & Thakur, 1999)

Nakano et al. (2001) ได้เสนอระบบการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ด้วยเจลคอนเดนส์แทนนิน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยเจลดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ แทนนินพบในใบและเปลือกไม้ของพืชหลายชนิด ในแทนนินชนิดนี้จะมีองค์ประกอบที่เป็นหมู่ฟีนอลไฮดรอกซิลฟีนอลที่มีความสามารถสูงในการจับกับไอออนโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม และยูเรเนียม (Sakaguchi & Nakajima, 1987; Yamaguchi, Higasida, Higuchi, & Sakata, 1992; Sharma & Forster, 1993; Nakano et al., 2001; Nakajima & Baba, 2004) ในกรณีของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์มีกลไกการดูดซับ 4 ขั้นตอน (รูปที่ 4 5 และ 6) คือ (1) ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของโครเมตต์ด้วยโมเลกุลของแทนนิน (2) การรีดิวซ์โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์เป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ ดังสมการต่อไปนี้

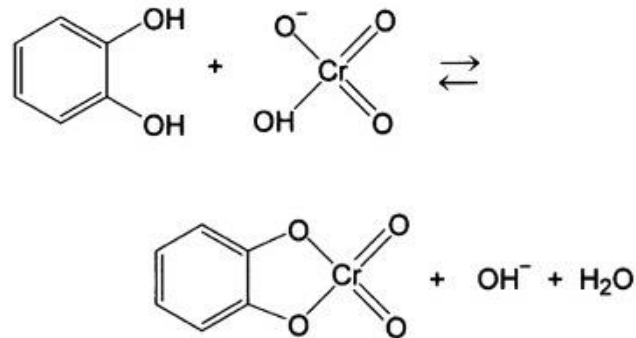


(3) การสร้างหมู่คาร์บอกซิลด้วยการออกซิเดชันของโมเลกุลแทนนิน และ (4) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ด้วยหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล ผู้วิจัยพบว่ามีการใช้โปรตอนจำนวนมากในการรีดิวซ์โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ ดังนั้นการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์โดยเจลคอนเดนส์แทนนิน จึงเกิดได้ดีในสภาวะกรด เพราะจะเกิดการชนถ่ายโปรตอนอย่างอัตโนมัติ จึงต้องเลือกพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม การสร้างหมู่คาร์บอกซิลจากการออกซิเดชันของโมเลกุลแทนนินจะเกิดควบคู่ไปกับการรีดักชันของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์เป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ ดังนั้นจึงมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนไอออนถูกสร้างใหม่ตลอดเวลาการดูดซับ จากการศึกษาทดสอบเจลคอนเดนส์แทนนินจากไม้ตระกูล Mimosa มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์สูงสุดถึง 287 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมเจลแทนนิน (น้ำหนักเปียก) ภายใต้สภาวะที่เจลมีความชื้น 77 % และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2



รูปที่ 4 กลไกการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนิน

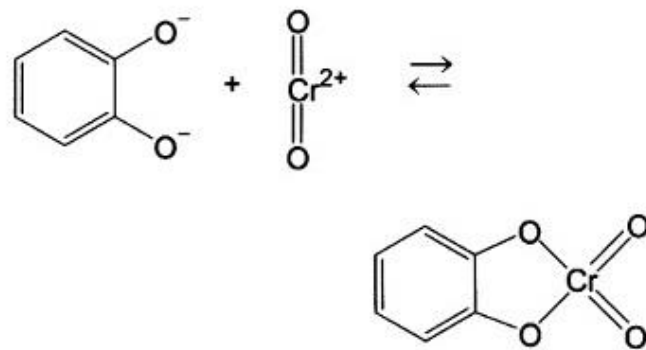
ที่มา: Nakano et al. (2001)



รูปที่ 5 โครงสร้างของปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์กับหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกัน (Catechol) ภายในเจลคอนเดนส์แทนนิน; ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกัน

กับ  $\text{HCrO}_4^-$

ที่มา: Nakajima & Baba (2004)



รูปที่ 6 โครงสร้างของปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์กับหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกัน (Catechol) ภายในเจลคอนเดนส์แทนนิน; การเชื่อมกันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกันกับ  $\text{CrO}_2^{2+}$

ที่มา: Nakajima & Baba (2004)

ในทศวรรษที่ผ่านมา มีรายงานหลายฉบับระบุว่าแทนนินสามารถใช้ดูดซับโลหะหนักหลายชนิดออกจากสารละลายได้เป็นอย่างดี โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่  $\text{Cr}^{6+}$   $\text{Pb}^{2+}$   $\text{Cu}^{2+}$   $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{Ni}^{2+}$  (Inoue, Paudyal, Nakagawa, Kawakita, & Ohto, 2010; Rodrigues, Sakane, Nunes Simonetti, & Thim, 2015; Nakano et al. 2001; Nakajima & Baba, 2004) การดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในสารละลายที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังรายงานการใช้เจลคอนเดนส์แทนนินเพื่อนำโลหะมีค่าอีก

หลายชนิดกลับมาใช้ รวมทั้งโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเจลคอนเดนส์แทนนินซึ่งมีแหล่งที่มาจากพืชต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับโลหะได้ดีมาก

Bacelo, Santos, & Botelho (2016) ได้ใช้เจลคอนเดนส์แทนนินแยกโลหะออกจากสารละลายได้ 2 วิธี วิธีแรกคือใช้กระบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การก่อตัวเป็นสารประกอบกับไอออนของโลหะนั้น เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกัน (Catechol) และสารประกอบนั้นจะมีเสถียรภาพมากขึ้น หากในบริเวณถัดไปมีหมู่ไฮดรอกซิลตัวที่ 3 อยู่ด้วย จะเกิดการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเจลคอนเดนส์แทนนิน ส่วนใหญ่จะทำให้พีเอชมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการก่อตัวที่เร็วและดีขึ้น เพราะพันธะโลหะเป็นแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ระหว่างประจุบวกของโลหะกับประจุลบบนพื้นผิวของเจลคอนเดนส์แทนนินเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้การดูดซับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  จึงเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอช (ในช่วงที่เป็นกรด) มีค่าสูงขึ้น โดยปริมาณที่ถูกดูดซับสูงสุด เกิดขึ้นที่พีเอช 4 หรือ 5 (Zhan & Zhao, 2003; Yurtsever & Sengil, 2009)

Nakano et al. (2001); Nakajima & Baba (2004) พบว่าปฏิกิริยารีดักชันเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เจลคอนเดนส์แทนนินสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น โครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ กระบวนการรีดักชันเกิดขึ้น เมื่อโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ถูกดูดซับบนผิวของเจลคอนเดนส์แทนนินจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของโครเมตกับหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ติดกันของเจลคอนเดนส์แทนนิน ตามด้วยรีดักชันโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์โดยหมู่ไฮดรอกซิล แต่โครเมียมไตรวาเลนซ์ที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกดูดซับบนผิวของเจลคอนเดนส์แทนนิน หากพีเอชของสารละลายต่ำกว่า 6

ตารางที่ 1 เจลแทนนินชนิดต่างๆ ที่ใช้ดูดซับโลหะ

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	$Q_m$ (mmol g/L)
Condensed-tannin gel	$Cr^{6+}$	5.52
Persimmon tannin gel	$Cr^{6+}$	5.27
Black wattle tannin gel	$Cr^{6+}$	9.39
Persimmon waste gel	$Cr^{6+}$	7.18

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	Q <sub>m</sub> (mmol g/L)
Tannin-immobilized mesoporous silica bead	Cr <sup>3+</sup>	1.3
Wattle tannin gel	Pb <sup>2+</sup>	0.56
Quebracho tannin resin	Pb <sup>2+</sup>	0.42
Valonia tannin resin	Pb <sup>2+</sup>	0.67
Valonia tannin resin	Cu <sup>2+</sup>	0.71
Mimosa tannin gel	Cu <sup>2+</sup>	0.69
Valonia tannin resin	Zn <sup>2+</sup>	0.54
Pinus tannin gel	Zn <sup>2+</sup>	1.0

ที่มา: Bacelo et al. (2016)

Jabeen, Kemp, & Chandra (2013) ได้สังเคราะห์ Magnetic cellulose nano-materials ที่ประกอบด้วย Zero-valent iron (nZVI) และเซลลูโลส มีการเตรียมโดยใช้วิธีดักจับและเตรียมที่ความเข้มข้นของแม่เหล็กเท่ากับ 57.2 emu ต่อกรัม ตัวดูดซับ Cellulose@nZVI สามารถแยกออกจากสารละลายหลังการดูดซับได้ภายในเวลาเพียง 30 วินาที โดยใช้แรงสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวดูดซับแม่เหล็กนี้มีการนำไปใช้ดูดซับอาร์เซไนต์ (Arsenite) โดยสามารถกำจัดได้สูงสุดถึง 99.27 % นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ใส่ Nano zero-valent iron ลงบน Barium ferrite microfibers สามารถกำจัด Pb<sup>2+</sup> สี Congo red และ Methylene blue ได้ด้วย ตัวดูดซับยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีแม้มีการใช้ไปแล้วถึง 5 รอบ ลักษณะพิเศษตัวดูดซับนี้เกิดจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่ย้ายของอิเล็กตรอนในชั้นระดับพลังงานที่แตกต่างกัน การผสม Nano zero-valent iron (10 นาโนเมตร) ใน Graphene (G-nZVI) โดย G-nZVI สามารถดูดซับ Pb<sup>2+</sup> จากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถแยกออกจากสารละลายได้ด้วยแม่เหล็ก ตัวอย่างของตัวดูดซับแม่เหล็กที่ใช้อัลลอยด์เป็นสารแม่เหล็ก คือ สารประกอบ Mesoporous Fe<sub>7</sub>Co<sub>3</sub>/carbon ซึ่งเตรียมโดยใช้วิธี Cocasting ผสม Fe<sub>7</sub>Co<sub>3</sub> alloy nanoparticles ลงใน Mesoporous carbon เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการใช้อนุภาคขนาดนาโนที่เป็นธาตุเดี่ยว เช่น Fe หรือ Co พบว่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบ Mesoporous Fe<sub>7</sub>Co<sub>3</sub>/carbon ดีกว่า ตัวดูด

ชั้นชนิดนี้สามารถดูดซับสีย้อมได้ปริมาณมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิว (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1,429 ตารางเมตรต่อกรัม) และปริมาณของรูพรุน (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.93 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) สูง นอกจากนี้ยังมีการนำคาร์บอนเคลือบบน Cobalt magnetic nanoparticles โดยใช้วิธี Catalytic chemical vapour deposition (CCVD) โดยใช้เอทานอล โคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) จะทำปฏิกิริยากับเอทานอล ในอุณหภูมิช่วง 700 - 900 องศาเซลเซียส ได้เป็นโลหะโคบอลต์ที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก โดยวัสดุคาร์บอนที่ใช้ เช่น กราไฟต์ (Graphite) นอกจากโคบอลต์ยังมีการเตรียมตัวดูดซับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและราคาถูก มีสมบัติแม่เหล็กและความจุการดูดซับสูงนี้เกิดเป็น Magnetic core และ Silica ( $\text{Ni@SiO}_2$ ) หุ้มภายนอกพบว่าเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยตัวดูดซับยังคงมีความจุของการดูดซับสูง แม้จะใช้ดูดซับและคายซับถึง 4 รอบ

Lin & Chang (2014) ได้สังเคราะห์ตัวดูดซับแม่เหล็กที่ทำจากคาร์บอนคือ Mesoporous  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{carbon aerogel}$  ซึ่งสามารถดูดซับสีย้อม Rhodamine B (RhB) ตัวดูดซับชนิดนี้เตรียมโดยกระบวนการ Hydrothermal ของ  $\text{FeSO}_4$  ใน Hexamethylenetetramine (HMTA)  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CA}$  มีสมบัติเป็น Ferromagnetic เนื่องจากมี  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และมีสมบัติเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพราะมี Antiferromagnetic  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 การกำจัดสีย้อม RhB ด้วย  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CA}$  ภายใต้แสงขาว

วัสดุไตรฟังก์ชันสามารถแยกออกด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกได้

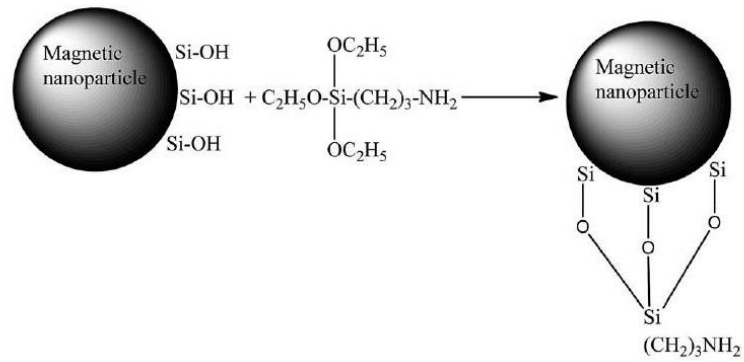
ที่มา: Lin & Chang (2014)



ตัวดูดซับชนิดนี้มีโครงสร้าง Mesoporous สามารถกำจัดสีย้อม RhB เพิ่มขึ้นจาก 83.5 เป็น 91 % และสามารถแยกโดยใช้สนามแม่เหล็กภายนอกได้ เพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการแยกออกจากสารละลาย

Cong, Ren, Wang, & Yu (2012) ได้พัฒนาตัวดูดซับแม่เหล็กที่ทำจากแกรฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นไฮโดรเจล สามารถสังเคราะห์ได้จากมีปฏิกิริยารีดักชันของ Graphene oxide sheets โดย Ferrous ions ขนาดนาโน ทำให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กบนแผ่นแกรฟีนของ  $\alpha$ -FeOOH และ  $Fe_3O_4$  สามารถประกอบเข้าด้วยกันกับแผ่นแกรฟีนเพื่อสร้าง Macroscopic graphene monoliths ได้ง่าย โดยการควบคุมค่าพีเอช พบว่าแกรฟีนไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถกำจัดสารมลพิษและใช้ในการดูดซับเพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์ได้ ดังนั้นหากราคาการผลิตถูกกว่าราคาปัจจุบัน คือ 12,000 - 17,000 บาทต่อกิโลกรัม ตัวดูดซับแม่เหล็กที่ทำจากแกรฟีนจะเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ

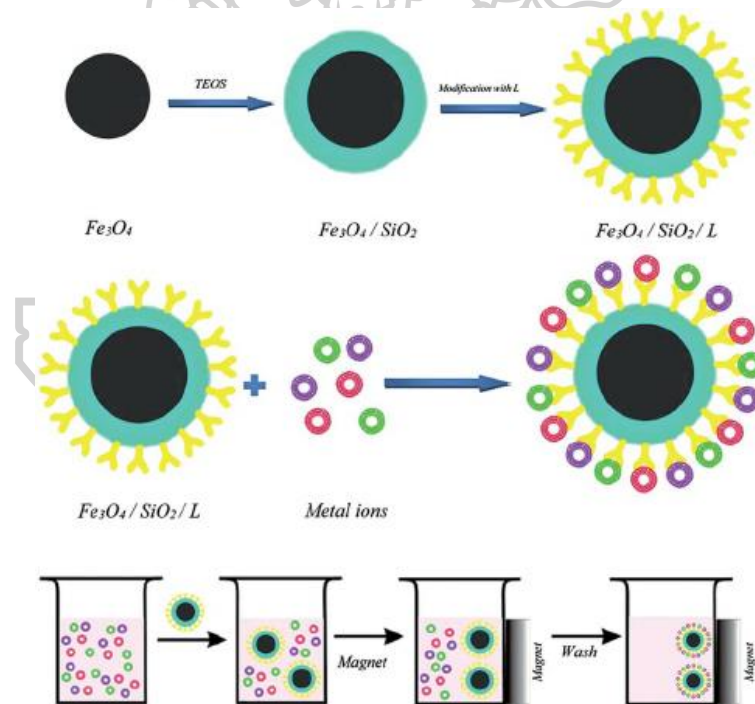
Zhang, Xing, Lang, & Liu (2008) สังเคราะห์อนุภาค  $Fe_3O_4/SiO_2$  nanocomposite aerogel powders โดยใช้วิธีสังเคราะห์  $Fe_3O_4$  จากนั้นฝังลงใน  $SiO_2$  เมทริกซ์โดยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสตามด้วยการควบแน่นของ Silicic acid ตัวดูดซับที่ได้นี้ไม่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งดีกว่า  $Fe_3O_4$  บริสุทธิ์ Silica-supported magnetic adsorbents ดังกล่าวยังสามารถปรับปรุงให้มีความเฉพาะเจาะจงได้โดยใช้การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน  $-NH_2$  โดยวิธี Immobilisation ของ Amino-silane บนพื้นผิวของตัวดูดซับ (รูปที่ 8) ตัวดูดซับนี้นำไปใช้ในการแยกฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) จากรากของชะเอม ตัวดูดซับมีความจำเพาะเจาะจงต่อฟลาโวนอยด์ โดยสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนของตัวดูดซับแม่เหล็กกับหมู่  $-OH$  และหมู่  $-CO$  ของฟลาโวนอยด์ นอกจากนี้ยังมีการดัดแปลงตัวดูดซับชนิดนี้ Schiff base L สามารถดูดซับ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ได้ดี ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการติดตามปริมาณในตัวอย่างธรรมชาติและตัวอย่างชีวภาพ (รูปที่ 9)



รูปที่ 8 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาการเคลือบ APTS {3-aminopropyltriethoxysilane

$NH_2(CH_2)_3Si(OC_2H_5)_3$  ด้วยอนุภาคแม่เหล็กซิลิกา

ที่มา: Zhang et al. (2008)



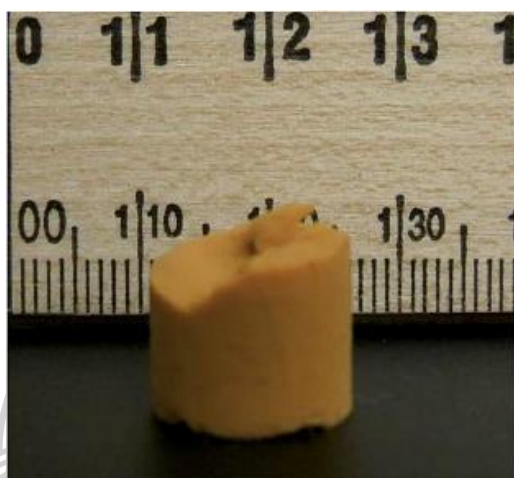
รูปที่ 9 วิธีการสังเคราะห์ Silica coated magnetic nanoparticles ที่ปรับปรุงด้วย

Schiff base (L) และลักษณะการนำแม่เหล็กแยกออกจากสารละลาย

ที่มา: Bagheri, Afkhami, Saber-Tehrani, & Khoshsafari (2012)



Brown & Hope-Weeks (2009) สารประกอบแม่เหล็กพวกเฟอร์ไรท์ถูกใช้เป็นสารแม่เหล็ก ด้วยเช่นกัน Zinc ferrite nanoparticles (ZFN)  $ZnFe_2O_4$  ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10 นาโนเมตร โลหะผสมดังกล่าวถูกบดโดย Ball-milled เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และนำมาเตรียม Monolithic zinc ferrite aerogels โดยวิธี Epoxide sol-gel ผลที่ได้อยู่ในรูปเจลสีน้ำตาลแดง มีความหนาแน่นต่ำและพื้นที่ผิวสูง (340 ตารางเมตรต่อกรัม) (รูปที่ 10)

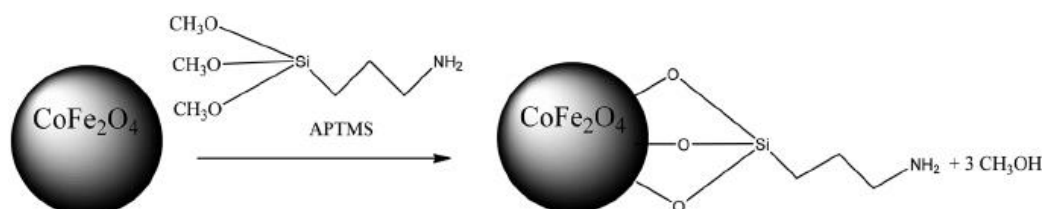


รูปที่ 10 ภาพถ่าย  $ZnFe_2O_4$  aerogel ทำจาก  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  และ  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  ใน 2-propanol  
ที่มา: Brown & Hope-Weeks (2009)

อนุภาคแม่เหล็กซิงค์เฟอร์ไรท์ขนาดนาโนที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Cetyl trimethylammonium bromide สำหรับดูดซับสีย้อม Direct Green 6 (DG6) Direct Red 31 (DR31) และ Direct Red 23 (DR23) สามารถทำงานได้ดี โดยการดูดซับเป็นไปตาม Langmuir isotherm นอกจากนี้ Mixed-metal zinc ที่มีเฟอร์ไรท์-ซิลิกาเป็นสารประกอบถูกนำมาผลิต Ferrite ( $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ )-silica aerogel ขนาดนาโน ผลผลิตที่ได้เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา (Ultra-superlight) มีความพรุนสูง ควบคู่กับสมบัติความเป็นแม่เหล็กของเฟอร์ไรท์

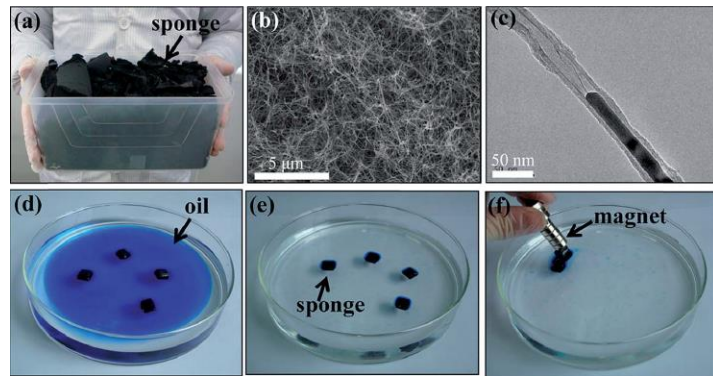
Liu, Yan, Tao, Yu, & Liu (2012) ได้นำโคบอลต์เฟอร์ไรท์มาเป็นสารประกอบในการผลิต แอโรเจล แอโรเจลชนิดนี้มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรลิซิสซึ่งเกิดจาก หมู่ OH ที่ผิว การสังเคราะห์ไฮบริดไฮโดรเจลนี้ ทำโดยนำ  $CoFe_2O_4$  NPs ไปเป็นตัวเชื่อม Carboxymethylcellulose เพื่อให้จับกับหมู่  $NH_2$  บนพื้นผิว (รูปที่ 11) ไฮบริดไฮโดรเจลที่มีอนุภาค

แม่เหล็ก  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ขนาดนาโนนี้กลายเป็นไฮโดรเจลระบบใหม่ที่ออกแบบมาให้สามารถใช้ดูดซับยาปริมาณมากและส่งไปยังตำแหน่งใกล้เคียงที่เป้าหมาย



รูปที่ 11 ปฏิกิริยาการเกิดหมู่ฟังก์ชันของ (3-aminopropyl)-trimethoxysilane (APTMS) และพื้นผิวอนุภาคนาโน (NP)  
ที่มา: Liu et al. (2012)

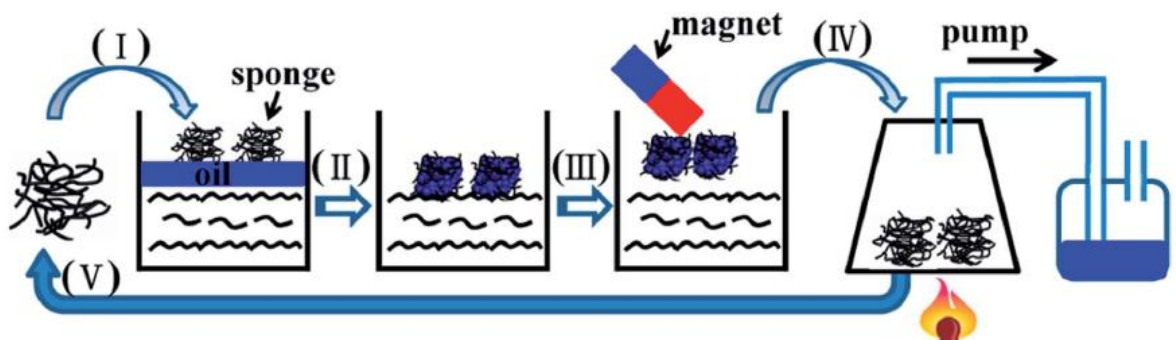
Gui et al. (2013) ได้พัฒนาสารประกอบเหล็กคาร์บอน (Iron-carbon) ที่เป็นตัวดูดซับแม่เหล็กเพื่อใช้กำจัดน้ำมันในรูปแบบ Magnetic carbon nanotube ที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Sponge; M-CNT sponge) โครงสร้างที่เป็นรูพรุนและเชื่อมต่อกันของ CNTs และกัก Fe ไว้ภายในสร้างขึ้นโดยใช้ Ferrocene และ Dichlorobenzene เป็นสารตั้งต้น (รูปที่ 12) ตัวดูดซับแม่เหล็กชนิดนี้ ดูดซับน้ำมันดีเซลสูงถึง 56 กรัมต่อกรัม เทียบได้กับความจุของการดูดซับ 99 % ฟองน้ำ CNT นี้ สามารถบีบน้ำมันออกทิ้งได้ (รูปที่ 13) และสามารถใช้แล้วนำกลับคืนมาได้โดยใช้แม่เหล็กดูดออกจากตัวกลาง การคายซับทำโดยใช้วิธีการให้ความร้อน M-CNT sponges ยังมีโครงสร้างเหมือนเดิม และมีความจุ และความจำเพาะสูงเมื่อมีการนำกลับมาใช้ใหม่ จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ตัวดูดซับแม่เหล็ก ในการกำจัดสารมลพิษอื่นๆ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เช่นกัน



รูปที่ 12 การกำจัดน้ำมันที่รั่วไหลบนผิวน้ำด้วย M-CNT sponges ภายใต้สนามแม่เหล็ก

- (a) ภาพฟองน้ำปริมาณ 5 ลิตร  
 (b) ภาพ SEM ของรูพรุน CNT  
 (c) ภาพ TEM ของ CNT ที่เติมไปด้วย Magnetic Fe nanowires  
 (d) การแพร่กระจายของน้ำมันย้อมสีฟ้า ใส่ M-CNT sponge 4 ชิ้นบนน้ำมัน  
 (e) พื้นผิวน้ำสะอาดหลังจากมีการดูดซับน้ำมันอย่างสมบูรณ์  
 (f) การเก็บฟองน้ำหลังจากการดูดซับโดยใช้แม่เหล็ก

ที่มา: Gui et al. (2013)



รูปที่ 13 การใช้และการรีไซเคิล M-CNT sponges ที่ใช้สำหรับการดูดซับน้ำมันที่รั่วไหล

(i) ใส่บนน้ำมัน (ii) ดูดซับน้ำมันที่รั่วไหล (iii) การเก็บรวบรวมโดยแม่เหล็ก

(iv) การบำบัด (v) นำมาใช้ใหม่

ที่มา: Gui et al. (2013)

ตารางที่ 2 ประยุกต์ใช้ตัวดูดซับแม่เหล็ก

สารประกอบตัวดูดซับ	การใช้งาน
<b>ด้านสิ่งแวดล้อม</b>	
Sodium alginate เคลือบบน $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparticles (Alg- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	กำจัด Malachite green ในสารละลายสังเคราะห์
Mn ร่วมกับ Maghemite nanoparticles	กำจัด As(V) and As(III) ในน้ำเสีย
ตัวดูดซับแม่เหล็ก $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MnO}_2$ โครงสร้าง Shell-core	กำจัด Pb(II) ในสารละลายสังเคราะห์
พอลิเมอร์ Carboxymethyl- $\beta$ -cyclodextrin (CM- $\beta$ -CD) ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาค $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ขนาดนาโน (CDpoly-MNPs)	กำจัด $\text{Pb}^{2+}$ $\text{Cd}^{2+}$ $\text{Ni}^{2+}$ ในน้ำเสีย
ตัวดูดซับแม่เหล็ก Fe-Al binary oxide	กำจัด Chromate ในสารละลายสังเคราะห์โดยใช้สารแม่เหล็กถาวรและสารแม่เหล็กยิ่งยวด (ใช้แม่เหล็กยิ่งยวดในการแยกออก)
Cobalt ferrite ทรงกลมกลวง	สกัด Uranium(VI) จากสารละลายสังเคราะห์
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ ผังลงใน Graphene oxide	กำจัด Methylene blue ในสารละลายสังเคราะห์
Magnetic-activated coke ร่วมกับอนุภาค $\text{Fe}_3\text{O}_4$	กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำที่มี 2,4,6-trinitrotoluene red
สารประกอบ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$	สกัด Benzo pyrene จากสารละลายสังเคราะห์
สารประกอบถ่านกัมมันต์ (PAC)/เหล็กออกไซด์	กำจัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำ
Magnetic mesoporous silica microspheres ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@m\text{SiO}_2$ )	เพิ่มความเร็วและปริมาณในการติดตามระดับความเป็นพิษของ Microcystin-LR ในน้ำ
Graphene grafted silica-coated $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@m\text{SiO}_2\text{-G}$ )	สกัดสารกำจัดศัตรูพืช (Thiamethoxam, imidacloprid, Acetamiprid และ Thiocloprid) ในตัวอย่างลูกแพร์และมะเขือเทศ

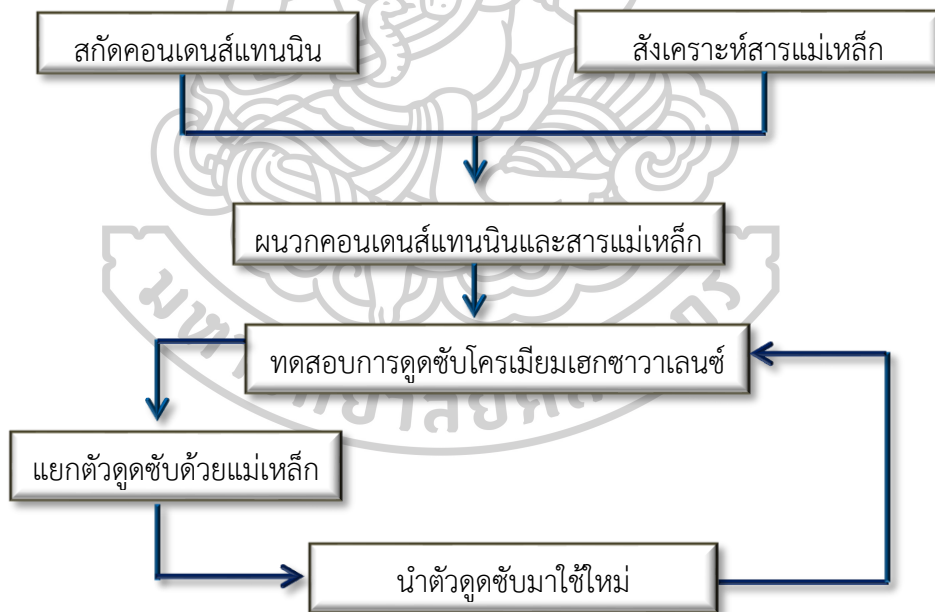
สารประกอบตัวดูดซับ	การใช้งาน
<b>ด้านการวิเคราะห์</b>	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /C/PANI (polyaniline) microbowls	หาปริมาณ Pyrethroids ในเครื่องดื่มชา (Cyhalothrin Beta-cypermethrin Esfenvalerate Permethrin และ Bifenthrin)
Hybrid materials ที่มาจากอนุภาค Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ขนาดนาโนและสังเคราะห์ Macrocyclic receptor carboxylato-pillar arene	สกัดยาฆ่าแมลงจากตัวอย่างเครื่องดื่ม
2,2'-thiodiethanethiol บน tetra-Et orthosilicate ที่ปรับปรุงด้วย Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanoparticles	แยกและปรับความเข้มข้นของ Hg Pb และ Cd ใน สิ่งแวดล้อมและตัวอย่างอาหาร
Ionic liquid เคลือบบน Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @graphene nanocomposite	หาปริมาณสารประกอบ Nitrobenzene
<b>ด้านชีวการแพทย์</b>	
Magnetite/graphene oxide/chitosan (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /GO/CS) composite	ดูดซับโปรตีน
สารประกอบ MWCNTs/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ขนาดนาโน	สกัด Fluoxetine จากปัสสาวะมนุษย์
multi-walled carbon nanotubes และอนุภาคเหล็กออกไซด์ขนาดนาโน	กำจัด amoxicillin
Cetyltrimethylammonium bromide บน พื้นผิวอนุภาค Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ขนาดนาโน	สกัดและปรับความเข้มข้นของ Mefenamic acid ในของเหลวชีวภาพ

ที่มา: Kharissova, Rasika Dias, & Kharisov (2015)

บทที่ 3  
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการศึกษา

การศึกษาวิจัยในเรื่อง “ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์และการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับแม่เหล็กบนเจลคอนเดนส์แทนนิน” แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การสกัดคอนเดนส์แทนนินจากสีเสียดเทศ (2) การสังเคราะห์สารแม่เหล็กชนิดต่างๆ (3) การเตรียมตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนนิน (4) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่สภาวะต่างๆ และการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนนินมาใช้ใหม่ ตามแผนผังการทดลองในรูปที่ 4 และมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 14 แผนผังการทดลอง



### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

- 1) เครื่องเขย่าสาร ยี่ห้อ BIBBY Stuart Scientific รุ่น ORBITAL SHAKER SO1
- 2) เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน ยี่ห้อ BUCHI รุ่น RE111 พร้อมกับอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ รุ่น BUCHI461 ใช้สำหรับระเหยสารตัวทำละลายออกจากสารละลายตัวอย่าง
- 3) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี-วิสิเบิล ยี่ห้อ รุ่น เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสาร ใช้สำหรับหาค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง
- 4) เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ SC รุ่น AD1040 ใช้สำหรับวัดค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่าง
- 5) ตู้อบสาร ยี่ห้อ BINDER และ Linking รุ่น LT900 ใช้สำหรับอบสารให้แห้ง ก่อนนำมาใช้งาน
- 6) เตาเผา ยี่ห้อ EUROTHERM ใช้สำหรับอบสารที่อุณหภูมิสูง ก่อนนำมาใช้งาน
- 7) แม่เหล็ก ใช้สำหรับทดสอบและดึงตัวดูดซับออกจากสารละลาย
- 8) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDS/EDX) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3 ใช้สำหรับวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ชนิดและปริมาณธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่าง
- 9) เครื่องชั่งยี่ห้อ METTLER TOLEDO ชนิด 2 ตำแหน่ง รุ่น PB3002 และ 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204
- 10) ตะแกรงร่อนขนาด 0.5 มิลลิเมตร และ 500 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Retsch
- 11) เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่นๆ

### 3.3 การสกัดคอนเดนส์แทนนินจากสีเสียดเทศ

นำก้อนสีเสียดเทศ บดด้วยครกหินให้ละเอียดจนเป็นผง ร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 0.5 มิลลิเมตร เตรียมอะซิโตนเข้มข้น 50 % โดยปริมาตร (น้ำ : อะซิโตน เท่ากับ 1 : 1) ชั่งผงสีเสียดเทศ 10 กรัม ใส่ขวดที่มีฝาปิด เติมน้ำอะซิโตนเข้มข้น 50 % ปริมาตร 400 มิลลิลิตร แล้วปิดฝาขวด เขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง เก็บสารละลายที่

กรองได้ไว้ หลังจากนั้นนำไปไล่อะซิโตนด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) เก็บสารสกัดคอนเดนส์แทนนิน (CT) ไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท บดคอนเดนส์แทนนินให้ละเอียดอีกครั้ง

### 3.4 การสังเคราะห์สารแม่เหล็กชนิดต่างๆ

#### 1) เหล็กออกไซด์ ในกลุ่ม Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

ชั่งเฟอร์ริคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 8.00 กรัม และเฟอร์ริคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 3.60 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เทลงขวดสี่คอต่อคอนเดนเซอร์และอุปกรณ์กวน กวนด้วยความเร็ว 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้ก๊าซไนโตรเจน เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ 80 มิลลิลิตรอย่างรวดเร็ว ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส กวนต่อเป็นเวลา 6 ชั่วโมงภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนสภาวะเป็นกลาง และล้างด้วยเอทานอล แยกอนุภาคเหล็กออกไซด์ออกจากสารละลาย อบที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (บุญยงช และคณะ, 2557)

#### 2) แมงกานีสเฟอร์ไรท์ (Manganese Ferrite; $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ )

เตรียมเฟอร์ริคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) และแมงกานีส(II)คลอไรด์ ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) ในอัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 2:1 ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้พีเอชเท่ากับ 11 ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส เมื่อสารละลายมีสีดำให้กวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แยกตะกอนแล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล จนเป็นกลาง นำตะกอนไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน (Liang & Wang, 2010)

#### 3) โคบอลต์เฟอร์ไรท์ (Cobalt Ferrite; $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )

ผสมเฟอร์ริคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ 25 มิลลิลิตร และโคบอลต์คลอไรด์ ( $\text{CoCl}_2$ ) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ 25 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3 โมลาร์อย่างช้าๆ ควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 11 - 12 เติมกรดโอเลอิก 2 - 3 หยด ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล จะได้ตะกอนสีดำ อบข้ามคืนที่อุณหภูมิ 100 องศา



เซลเซียส และอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (Maaz, Mumtaz, Hasanain, & Ceylan, 2007)

นำสารแม่เหล็กที่ได้ทั้ง 3 ชนิดไปหาค่าประกอบและโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX Spectroscopy)

### 3.5 การเตรียมตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนนิน

ชั่งคอนเดนส์แทนนิน 2.5 กรัม ลงในขวดที่มีฝาปิด เติมนีโอทานอลปริมาณ 10 กรัม เขย่าจนละลาย เติมน้ำแม่เหล็กที่เตรียมไว้ 2.5 กรัม เติมนีโฟอร์มัลดีไฮด์ (CH<sub>2</sub>O) 10 กรัม ปิดฝาให้สนิท อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กัดเจลที่ได้ผ่านตะแกรงขนาด 500 ไมโครเมตร (Nakano et al., 2001) นำเจลคอนเดนส์แทนนินที่ได้ไปแช่สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อกำจัดสารแม่เหล็กที่ไม่ถูกผนวกเข้าไปในเจล ล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชเป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงอีกครั้ง เก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้งาน

### 3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนซ์และการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนนินมาใช้ใหม่

การหาปริมาณโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ด้วยวิธีทำให้เกิดสี โดยใช้ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (C<sub>13</sub>H<sub>14</sub>N<sub>4</sub>O) มีขั้นตอนดังนี้ (APHA., 1998; Air Resources Board., 1997)

#### 1) เตรียมสารละลายโครเมียมเฮกซวาเลนซ์

เตรียมสารละลายโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (เก็บในอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียสและไม่เกิน 4 สัปดาห์) และจากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้สารละลายเข้มข้น 20 40 60 100 200 400 600 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 2) เตรียมสารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์

ชั่งไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 0.5 กรัม ละลายด้วยอะซิโตนและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร (เตรียมในขวดสีชา และทิ้งเมื่อสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี)

### 3) การสร้างกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ มา 0.1 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนพีเอช 1 (ซึ่งปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6 โมลาร์) เติมสารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 1 มิลลิลิตร เขย่าและทิ้งไว้เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี-วิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน เพื่อหาสมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์

### 4) การหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายตัวอย่าง

ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนพีเอช 1 (ซึ่งปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6 โมลาร์) เติมสารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 1 มิลลิลิตร เขย่าและทิ้งไว้เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี-วิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์

โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์และการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนินมาใช้ใหม่ แบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆ ดังนี้

1) ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์โดยไม่ปรับพีเอชเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท (Potassium Dichromate;  $K_2Cr_2O_7$ ) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร เติมตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลคอนเดนส์แทนินที่เตรียมไว้ 1 กรัม (น้ำหนักเปียก) เขย่าสารละลายที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง และเก็บสารละลายตามระยะเวลาต่างๆ จนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล (โดยมีการเก็บถี่ในช่วงแรกและห่างขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มคงที่) นำไปหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ด้วยวิธีทำให้เกิดสีโดยใช้ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี-วิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่ระยะเวลาต่างๆ

2) ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์และพีเอชที่สารแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ปรับพีเอชในแต่ละชุดการทดลองให้ได้ 1.0 3.0 5.0 และ 7.0 ด้วยสารละลายไนตริก หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจล

คอนเดนส์แทนนินที่เตรียมไว้ 1 กรัม (น้ำหนักเปียก) เขย่าสารละลายที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลาที่การดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เข้าสู่สมดุลตามที่ได้ศึกษา มาแล้วข้างต้น และเก็บสารละลายที่ระยะเวลาต่างๆ นำไปหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ด้วยวิธี ทำให้เกิดสีโดยใช้ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ และนำไปหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ และใช้สารละลาย โพแทสเซียมไดโครเมท ซึ่งไม่เติมเจลดคอนเดนส์แทนนินเป็นชุดควบคุม รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

3) ศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงบนเจลดคอนเดนส์แทนนินกลับมา ใช้ใหม่ โดยหลังจากการดูดซับเข้าสู่สมดุล ทำการแยกเจลดออกโดยใช้แม่เหล็กดึงตัวดูดซับออกจาก สารละลาย จากนั้นนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วมาล้างด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์และน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชของน้ำล้างเป็นกลาง ผึ่งลมจนแห้งและนำกลับไปใช้ทดสอบ ดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ชุดใหม่อีกครั้ง ทำการทดสอบซ้ำรวม 5 รอบ เนื่องจากโดยทั่วไปในการ ทดสอบการใช้งานของตัวดูดซับจะใช้ซ้ำ 4 - 5 รอบ เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัว ดูดซับ (Gurung et al., 2013; Jabeen, Kemp, & Chandra, 2013) วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยการ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

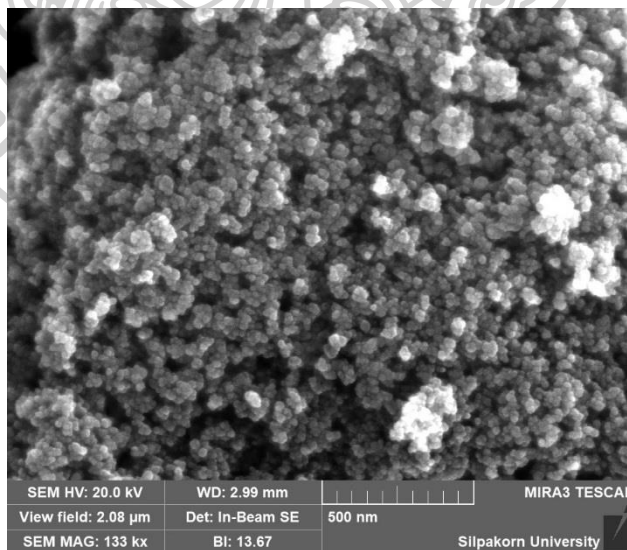


## บทที่ 4

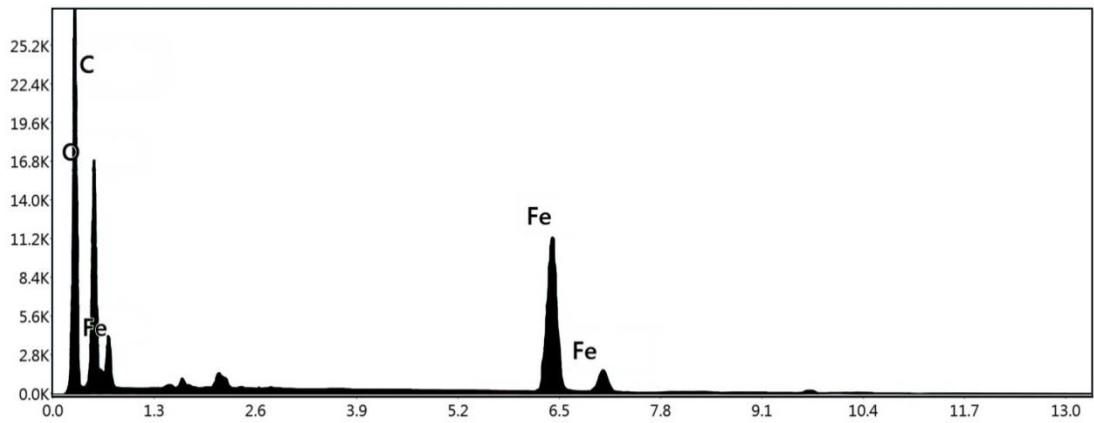
### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการศึกษา

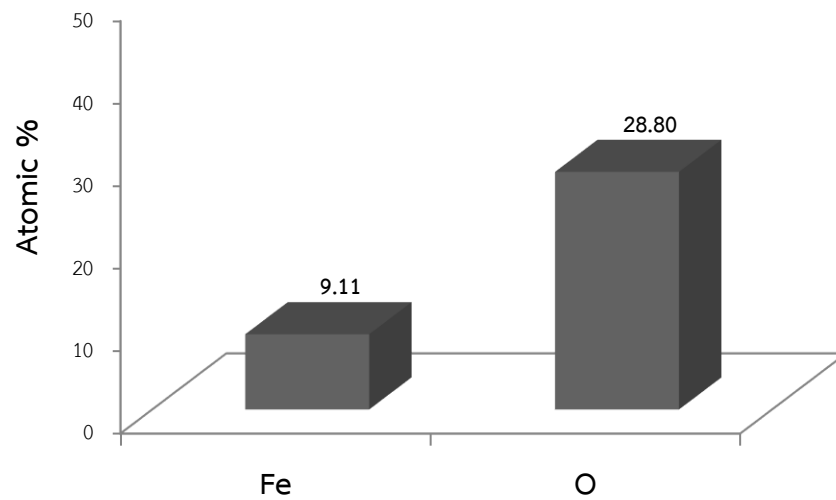
จากการนำสารแม่เหล็กที่ได้ทั้ง 3 ชนิดไปหาค่าองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของสารแม่เหล็กด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX Spectroscopy) พบว่าสารแม่เหล็กชนิดแรกคือ เหล็กออกไซด์ มีสูตรโมเลกุลของเหล็กออกไซด์โดยตัวสม่ำเสมอ (รูปที่ 15) และพบสเปกตรัมของธาตุ Fe และ O ตามสูตรโมเลกุลของเหล็กออกไซด์ โดยมีปริมาณอะตอม Fe อยู่ที่ 9.11 % แต่ไม่สามารถเทียบอัตราส่วนอะตอมได้ เนื่องจากปริมาณ O ที่วัดได้ส่วนหนึ่ง เป็น O ที่มาจากกาาที่ใช้ติดสารแม่เหล็กขณะทำการวิเคราะห์ (รูปที่ 16 และ 17) อย่างไรก็ตามสเปกตรัม EDX ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการศึกษามีลักษณะใกล้เคียง และสอดคล้องกับการศึกษาของ Bachan, Asha, Jeyarani, Kumar, & Shyla (2015) ทำให้ยืนยันได้ว่าสารแม่เหล็กดังกล่าวคือ เหล็กออกไซด์



รูปที่ 15 ภาพถ่าย SEM ของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_3O_4$ )

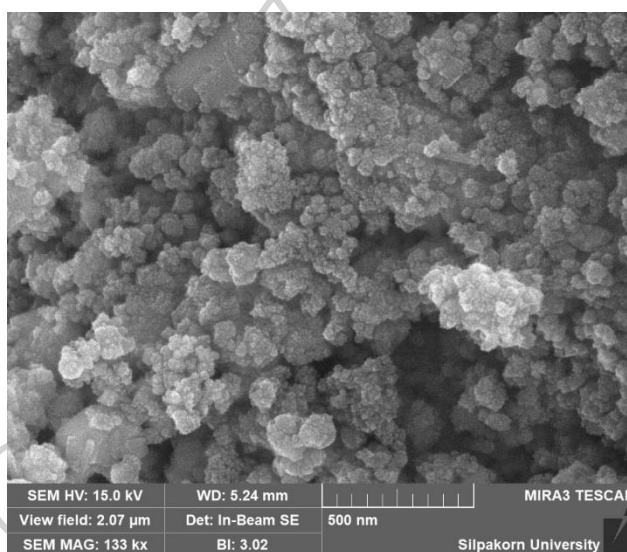


รูปที่ 16 สเปกตรัม EDX ของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_3O_4$ )

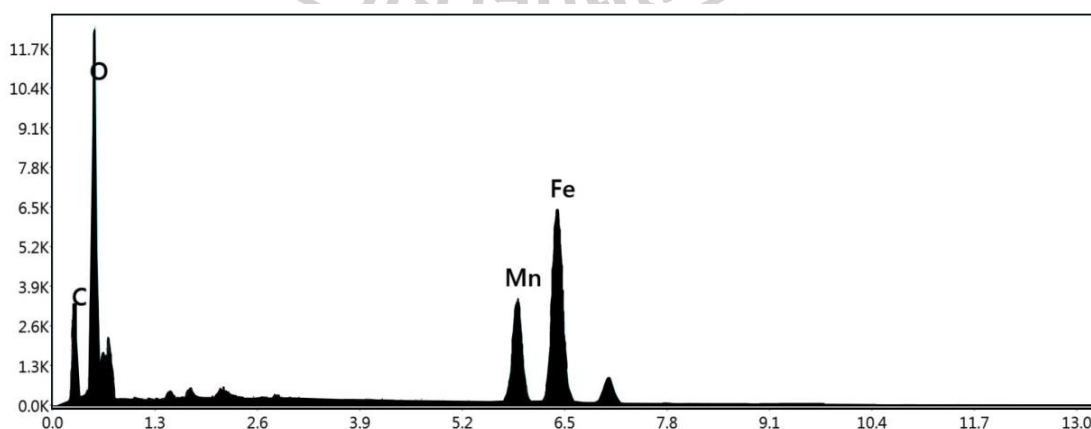


รูปที่ 17 องค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_3O_4$ )

สารแม่เหล็กชนิดที่ 2 คือ แมงกานีสเฟอร์ไรท์ มีสูตรทางวิทย์เป็นแผ่น (Sheet) การกระจายตัวสม่ำเสมอเช่นเดียวกับสารแม่เหล็กชนิดแรก (รูปที่ 18) สเปกตรัมของธาตุหลัก Fe และ Mn เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมของธาตุทั้งสอง พบว่ามีค่าใกล้เคียง 2 : 1 ตามสูตรโมเลกุลของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ (รูปที่ 19 และ 20) นอกจากนี้สเปกตรัม EDX ของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ที่ได้จากการศึกษามีลักษณะใกล้เคียง และสอดคล้องกับการศึกษาของ Rahmayeni, Syukri, Novesar, Emriadi, & Yeni (2017) ทำให้ยืนยันได้ว่าสารแม่เหล็กดังกล่าวคือ แมงกานีสเฟอร์ไรท์

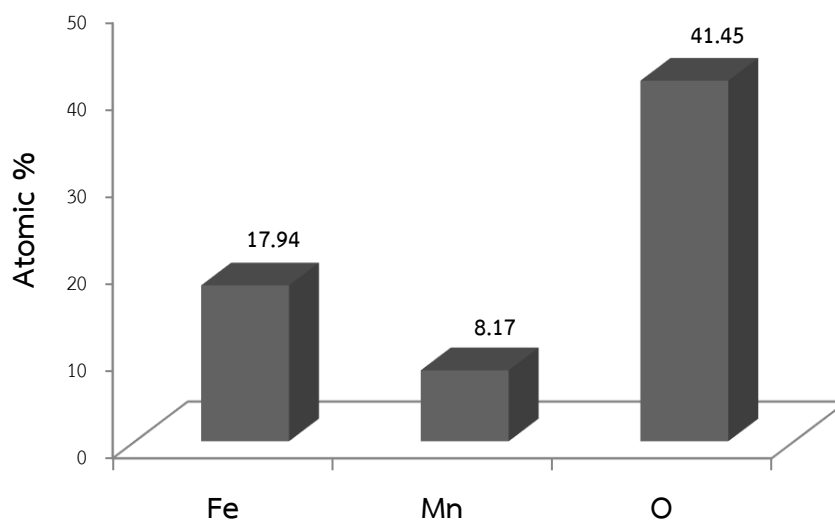


รูปที่ 18 ภาพถ่าย SEM ของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ( $MnFe_2O_4$ )



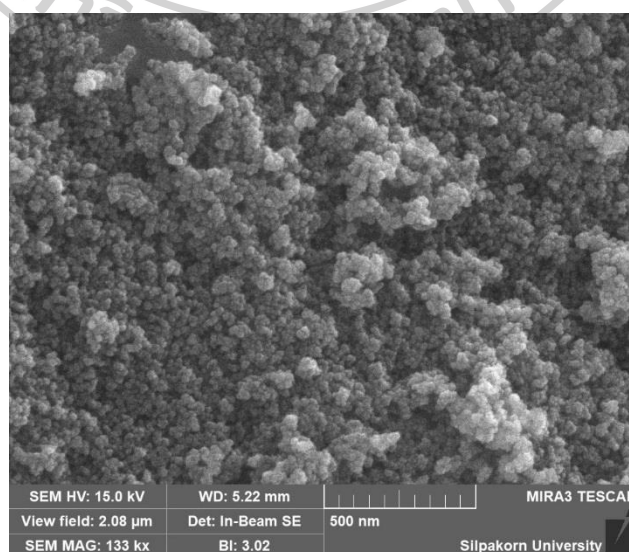
รูปที่ 19 สเปกตรัม EDX ของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ( $MnFe_2O_4$ )



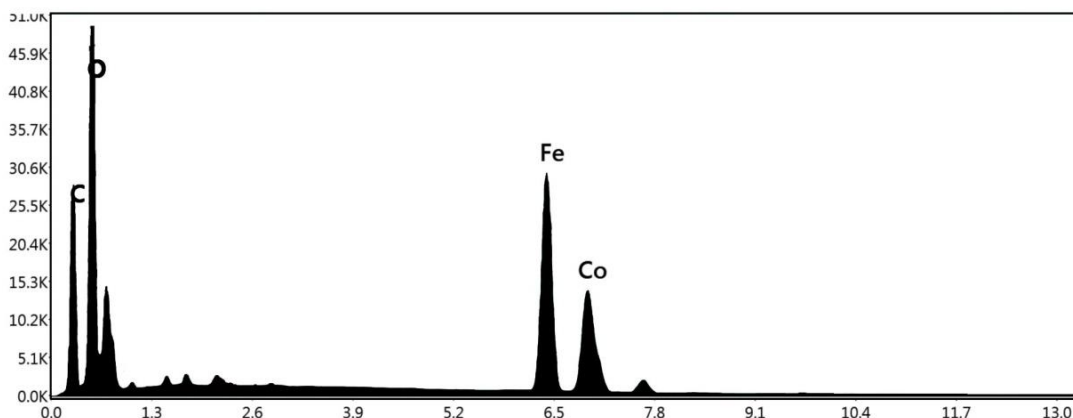


รูปที่ 20 องค์ประกอบของแมงกานีสเฟอร์ไรท์ ( $MnFe_2O_4$ )

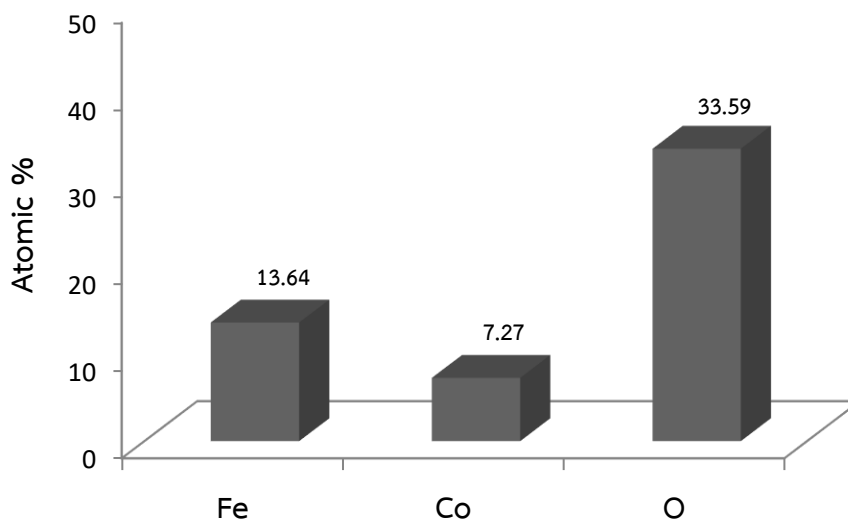
และสารแม่เหล็กชนิดสุดท้าย คือ โคบอลต์เฟอร์ไรท์ มีลักษณะสัณฐานคล้ายเหล็กออกไซด์ (รูปที่ 21) จากสเปกตรัมของธาตุหลัก Fe และ Co เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมจะได้ใกล้เคียง 2 : 1 ตามสูตรโมเลกุลของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ (รูปที่ 22 และ 23) นอกจากนี้สเปกตรัม EDX ของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ที่ได้จากการศึกษามีลักษณะใกล้เคียง และสอดคล้องกับการศึกษาของ Gokul Raja, Sreenija, & Balamurugan (2015) ทำให้ยืนยันได้ว่าสารแม่เหล็กดังกล่าวคือ โคบอลต์เฟอร์ไรท์



รูปที่ 21 ภาพถ่าย SEM ของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ( $CoFe_2O_4$ )



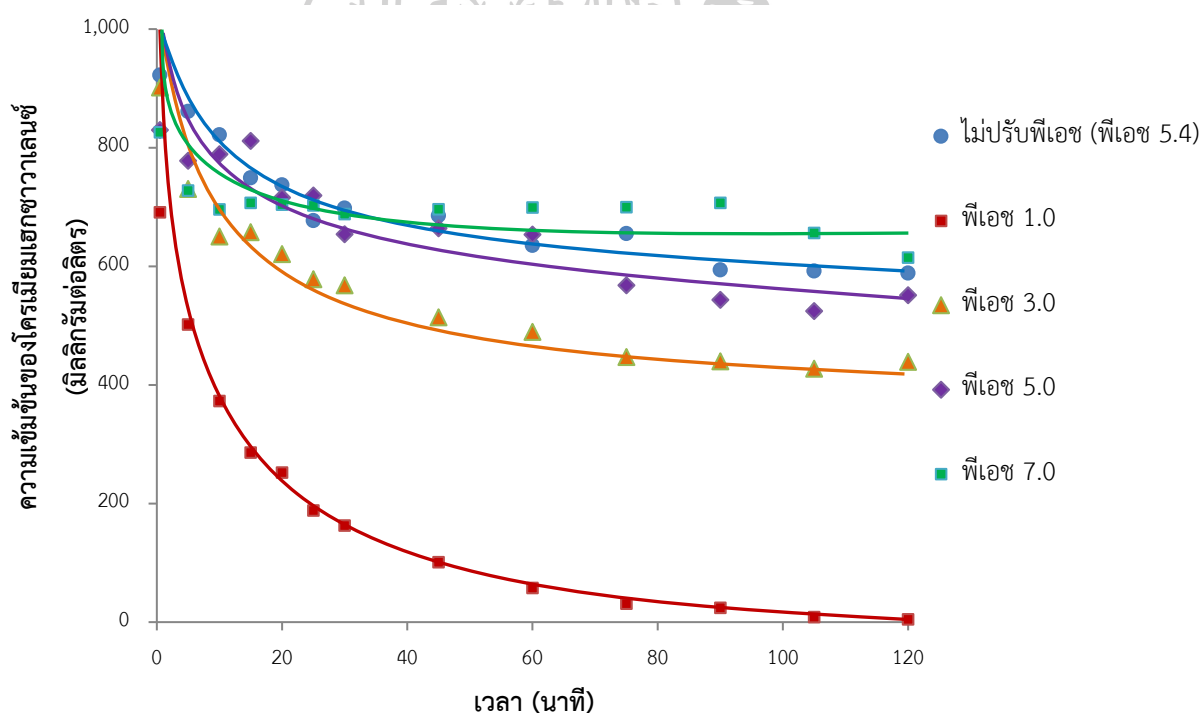
รูปที่ 22 สเปกตรัม EDX ของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )



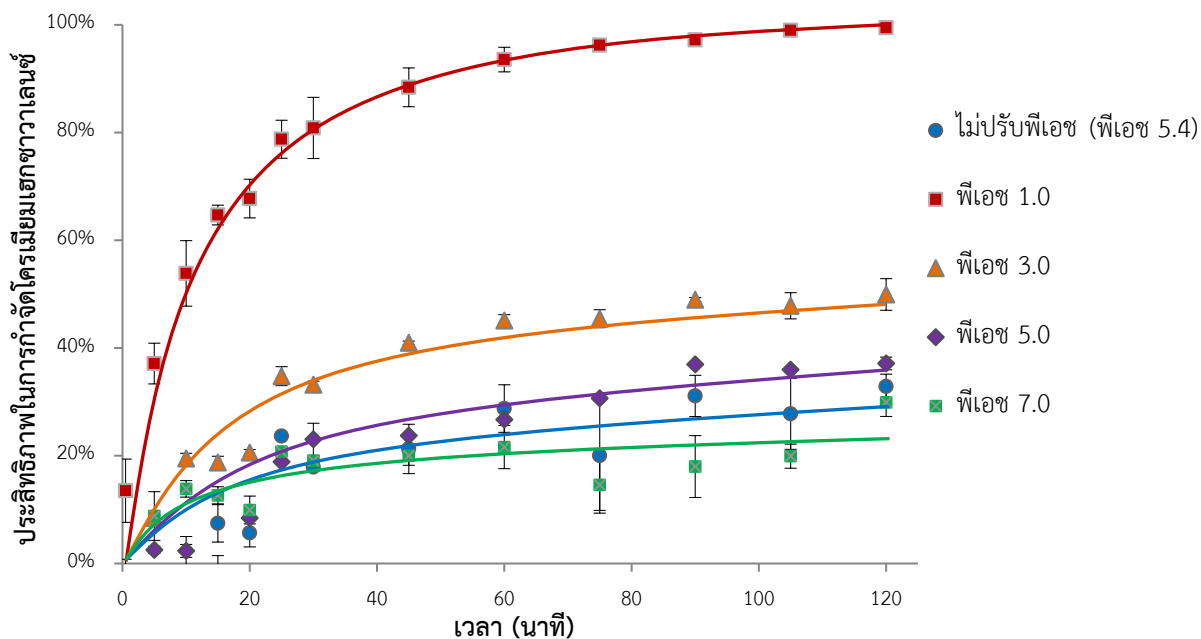
รูปที่ 23 องค์ประกอบของโคบอลต์เฟอร์ไรท์ ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายที่ไม่ปรับพีเอช (พีเอช 5.4) พบว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 120 นาที เมื่อทดสอบหาพีเอชของสารละลายที่เจลซึ่งผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ดีที่สุดภายในช่วงดังกล่าว พบว่าตัวดูดซับชนิดแรก คือ เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์ เมื่อแช่ในสารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่สภาวะพีเอชต่างๆ

จะทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายลดลงตามเวลา (รูปที่ 24) ที่สภาวะพีเอช 1.0 เหลือโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เพียง 4.73 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใน 120 นาที ส่วนในสารละลายพีเอช 3.0 5.0 และ 7.0 มีความเข้มข้นเท่ากับ 438.87 551.20 และ 614.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าเจลดังกล่าวสามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เกิดขึ้นดีที่สุดที่สุดในสารละลายพีเอช 1.0 โดยกำจัดได้ถึง 99.46% แต่ในสภาวะพีเอช 3.0 การดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ลดลงเหลือ 49.95% และมีค่าลดลงต่อเนื่องเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยในสภาวะพีเอช 5.0 ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพียง 37.14% และลดลงเหลือเพียง 29.92% ในสารละลายพีเอช 7.0 (รูปที่ 25)

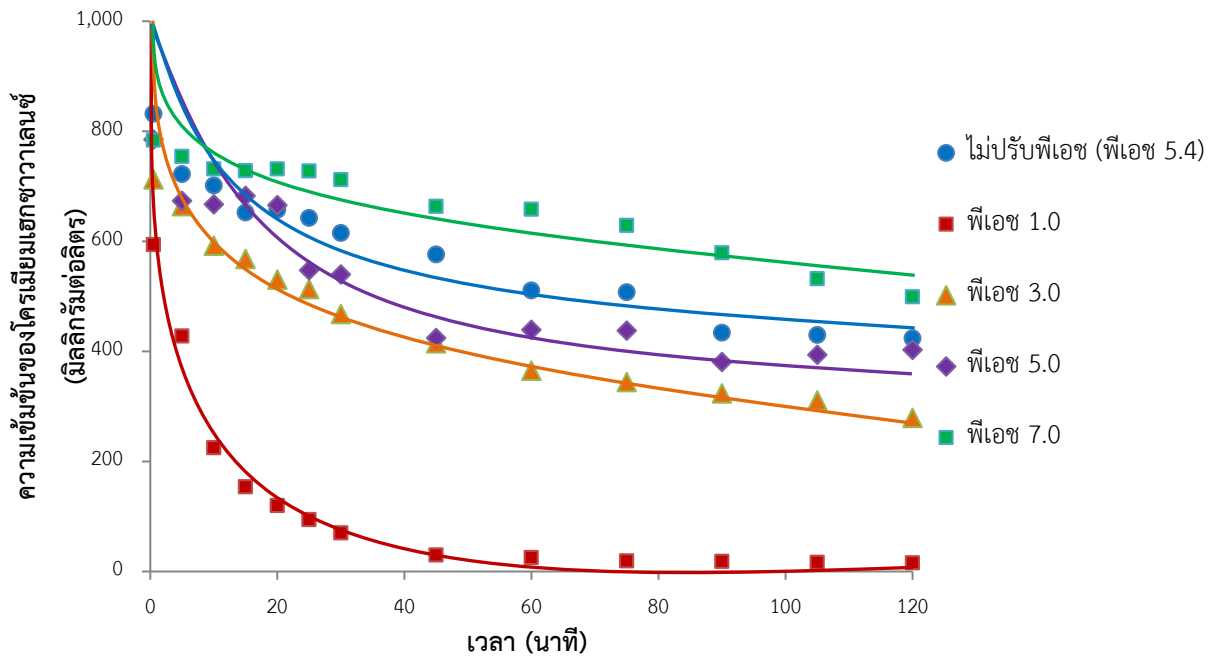


รูปที่ 24 ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที ของเจลดคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์

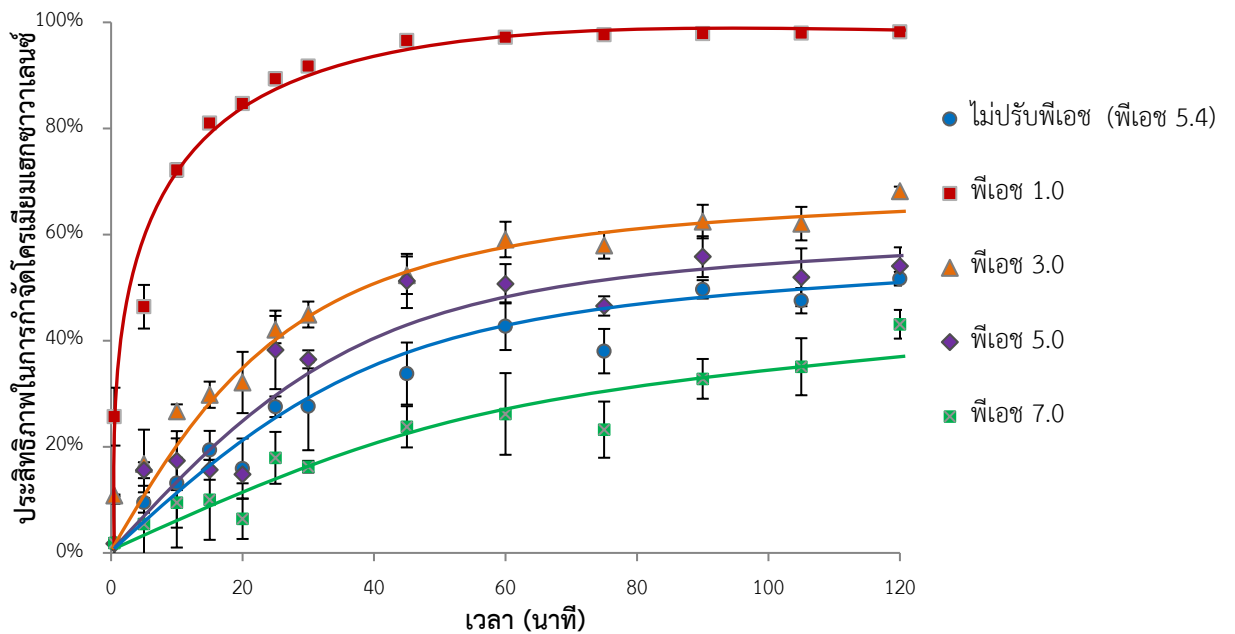


รูปที่ 25 ประสิทธิภาพการกำจัดโครโมคลอโรฟิลล์ในใบข้าวเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์

ตัวดูดซับชนิดที่ 2 คือ เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์ เมื่อใช้ในสารละลายโครโมคลอโรฟิลล์ที่สภาวะพีเอชต่างๆ จะทำให้ความเข้มข้นของโครโมคลอโรฟิลล์ในสารละลายลดลงตามเวลา ที่สภาวะพีเอช 1.0 เหลือโครโมคลอโรฟิลล์เพียง 15.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใน 120 นาที และเท่ากับ 279.07 402.80 และ 498.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3.0 5.0 และ 7.0 ตามลำดับ (รูปที่ 26) ดังนั้นเจลดังกล่าวสามารถดูดซับโครโมคลอโรฟิลล์ได้ดีที่สุดในสารละลายพีเอช 1.0 เช่นกัน โดยกำจัดได้ถึง 98.21% แต่ในสภาวะพีเอช 3.0 การดูดซับโครโมคลอโรฟิลล์ลดลงเหลือ 68.17% และมีค่าลดลงต่อเนื่องเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยในสภาวะพีเอช 5.0 ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพียง 54.06% และลดลงเหลือเพียง 43.10% ในสารละลายพีเอช 7.0 (รูปที่ 27)

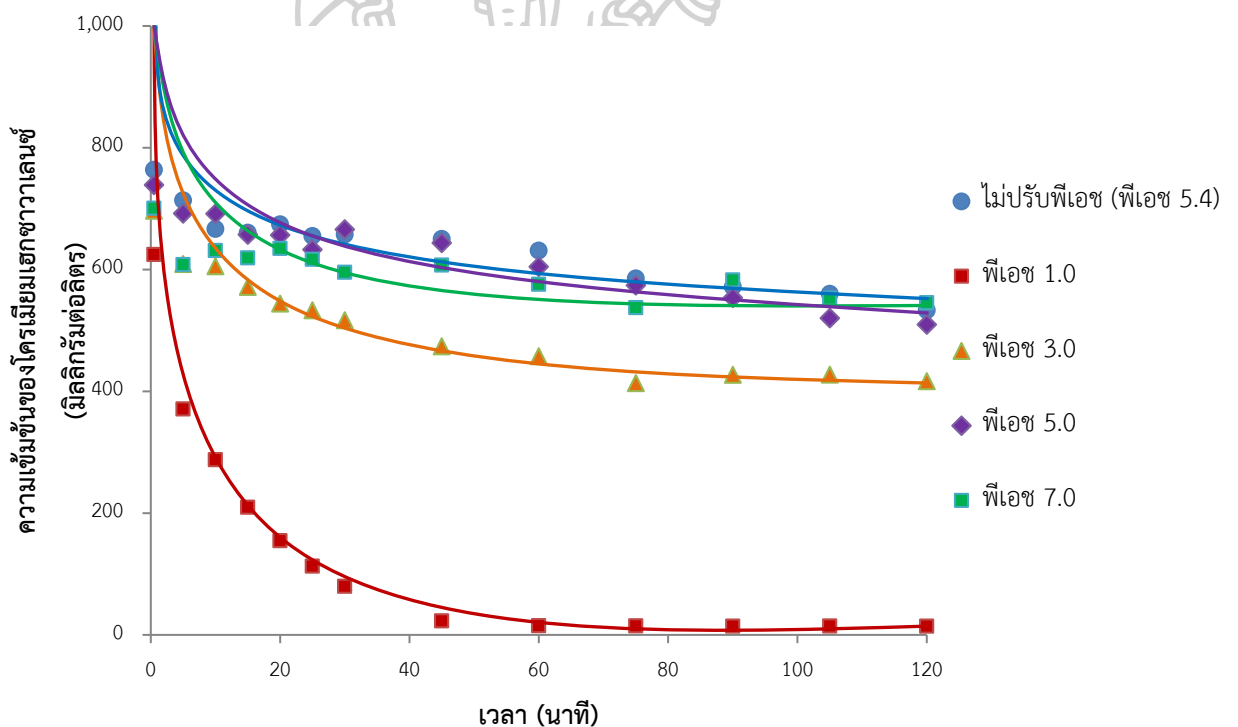


รูปที่ 26 ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซวาเลนต์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์



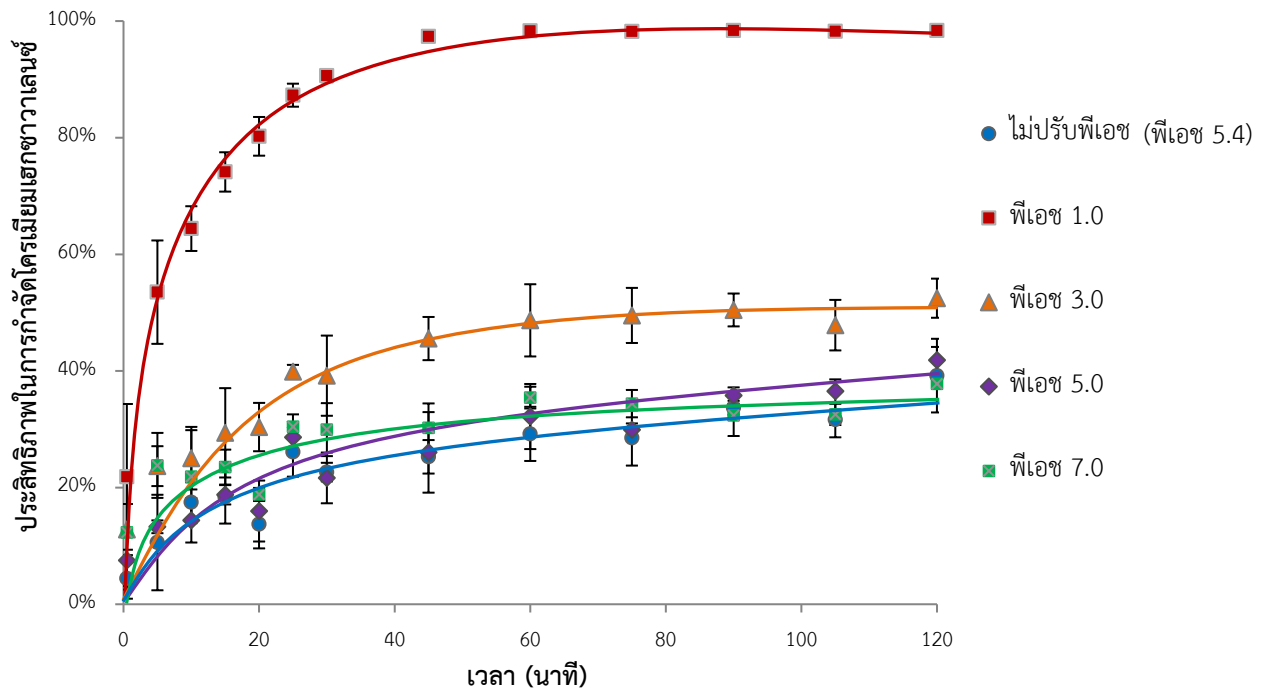
รูปที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนต์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์

และตัวดูดซับชนิดสุดท้าย คือ เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์ เมื่อแช่ในสารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่สภาวะพีเอชต่างๆ จะทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายลดลงตามเวลาที่สภาวะพีเอช 1.0 เหลือโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เพียง 14.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใน 120 นาที และเท่ากับ 416.67 509.73 และ 545.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3.0 5.0 และ 7.0 ตามลำดับ (รูปที่ 28) เจลดังกล่าวจึงสามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ดีที่สุดในสารละลายพีเอช 1.0 โดยกำจัดได้ถึง 98.38% แต่ในสภาวะพีเอช 3.0 การดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ลดลงเหลือ 52.48% และมีค่าลดลงต่อเนื่องเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยในสภาวะพีเอช 5.0 ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพียง 41.86% และลดลงเหลือเพียง 37.79% ในสารละลายพีเอช 7.0 (รูปที่ 29)

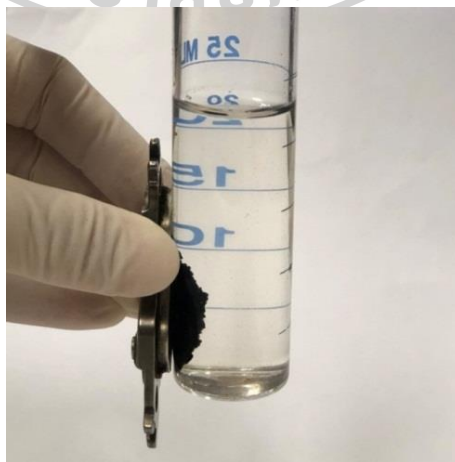


รูปที่ 28 ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์



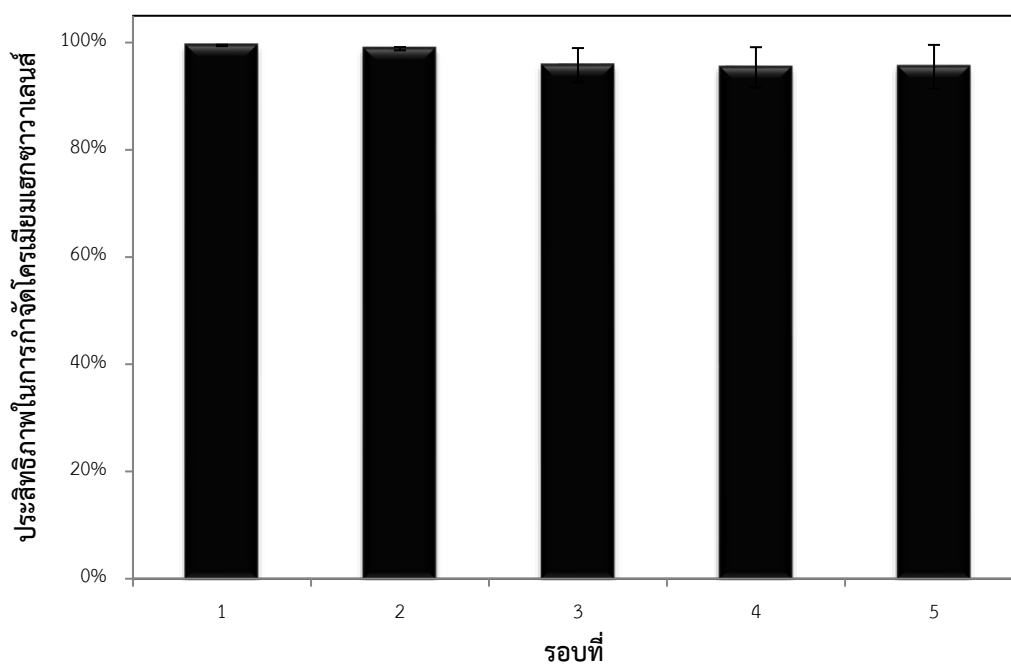


รูปที่ 29 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในช่วงระยะเวลา 120 นาที ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์เฟอร์ไรท์ เมื่อนำเจลมาทดสอบการใช้ซ้ำจำนวน 5 รอบ นำเจลไปแช่ในสารละลายโครเมียมเฮกซวาเลนซ์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.0 ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดการดูดซับได้ดีที่สุด และใช้เวลา 120 นาที หลังการดูดซับแต่ละรอบได้แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายโดยใช้แม่เหล็กดูดขึ้น ดังรูปที่ 30 เพื่อนำมาล้างด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์และน้ำปราศจากไอออนก่อนเพื่อนำไปใช้ทดสอบรอบต่อไป



รูปที่ 30 การแยกตัวดูดซับออกจากสารละลายโดยใช้แม่เหล็ก

พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์ ในการทดสอบรอบที่ 1 - 5 มีค่าเท่ากับ 99.46% 98.85% 95.76% 95.38% และ 95.47% ตามลำดับ (รูปที่ 31) ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ โดยใช้ ANOVA ซึ่ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กทั้ง 5 รอบมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $\alpha$  เท่ากับ 0.05



รูปที่ 31 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ของเจลที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์ซึ่งนำมาใช้ซ้ำ

สำหรับตัวดูดซับชนิดที่ 2 คือ เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กชนิดแมงกานีสเฟอร์ไรท์ เมื่อนำเจลมาทดสอบการใช้ซ้ำจำนวน 5 รอบ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ รอบที่ 1 - 5 มีค่าเท่ากับ 98.21% 98.45% 98.05% 97.95% และ 98.18% ตามลำดับ (รูปที่ 32) ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ โดยใช้ ANOVA ซึ่ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กทั้ง 5 รอบมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $\alpha$  เท่ากับ 0.05 เช่นเดียวกัน





เจลที่ได้ไม่จับกันเป็นก้อน เจลที่ได้มีขนาดเล็กเป็นผงละเอียด ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสของเจลค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่งผลให้เจลผนวกสารแม่เหล็กชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่ดีกว่า โดยในสารละลายพีเอช 1.0 การดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เกิดขึ้นสูงสุดถึง 99.46% แต่ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลงเหลือเพียง 29.92% ในสารละลายพีเอช 7.0 ส่วนเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กอีก 2 ชนิด มีพฤติกรรมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในทำนองเดียวกัน โดยเจลที่ผนวกกับแมงกานีสเพอร์ไรท์ ดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ได้ 98.21% และลดลงเหลือเพียง 43.10% ในสารละลายพีเอช 7.0 และสำหรับเจลคอนเดนส์แทนนินผนวกโคบอลต์เพอร์ไรท์ การดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ยังคงสูงในระดับเดียวกันคือ 98.38% และต่ำสุด ในสารละลายพีเอช 7.0 โดยกำจัดได้เพียง 37.79% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางสถิติของการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินผนวกสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด ในสารละลายพีเอช 1.0 ภายในระยะเวลา 120 นาที พบว่าเจลคอนเดนส์แทนนินผนวกสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ไม่แตกต่างกัน

จากการที่ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กแปรผกผันกับพีเอชของสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินปกติที่ไม่มีการผนวกสารแม่เหล็กในรายงานของ Nakano et al. (2001), Demiral, Demiral, Tumsek, & Karabacakoglu (2008) และ Tamirat, Khalid, & Shimeles (2014) เนื่องจากในพีเอชต่ำหรือเป็นกรดสูงนั้น จะมีโปรตอนจำนวนมาก ส่งผลต่อกลไกการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินในขั้นตอนที่ (1) ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของโครเมตด้วยโมเลกุลของแทนนิน ส่งผลให้ขั้นตอนที่ (2) การรีดิวซ์โครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ (3) การสร้างหมู่คาร์บอกซิลด้วยการออกซิเดชันของโมเลกุลแทนนิน และ (4) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ด้วยหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามลำดับ ทำให้เกิดการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่สภาวะพีเอชต่ำได้เป็นอย่างดี และการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เกิดขึ้นสูงถึง 99.46% ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Nakano et al. (2001) ที่สามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์สูงสุดใกล้เคียง 100% ที่ระยะเวลาเพียง 40 นาที อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ต้องใช้เวลาถึง 120 นาที จึงจะสามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้หมด คาดว่าเนื่องจากปริมาณของคอนเดนส์แทนนินในเจล 1 กรัม ถูก

แทนที่ด้วยสารแม่เหล็กที่ผนวกเข้าไป ทั้งนี้จากการนำเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กไปเผาที่ 800 องศาเซลเซียส พบว่าเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณสารแม่เหล็กอยู่ 45 - 55 % โดยน้ำหนัก สาเหตุนี้จึงส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิดนั้น ใช้ระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้นอีกเท่าตัว อย่างไรก็ตามข้อแตกต่างที่พบนี้แสดงให้เห็นว่าเจลคอนเดนส์แทนนินทำหน้าที่กำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ดี โดยสารแม่เหล็กที่ผนวกเข้าไปไม่มีผลต่อการดูดซับที่เกิดขึ้น

การพัฒนาเจลคอนเดนส์แทนนินให้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก โดยยังคงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์แบบเจลคอนเดนส์แทนนินทั่วไป จึงนับเป็นข้อได้เปรียบในแง่การนำไปใช้ เพราะสามารถใช้แม่เหล็กดูดแยกเจลออกจากสารละลายได้ทันที หลังเสร็จสิ้นกระบวนการดูดซับ จัดว่าสะดวกและรวดเร็วกว่าการแยกโดยการกรองออก และสารแม่เหล็กที่ผนวกลงไปไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายลดลง

อย่างไรก็ตามในแง่ของการนำกลับมาใช้ใหม่ เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสเฟอร์ไรท์ สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ไม่น้อยกว่า 5 รอบ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในแต่ละรอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกกับโคบอลต์เฟอร์ไรท์ มีคุณสมบัติในการนำกลับมาใช้ใหม่ดีกว่าเจล 2 ชนิดแรก เพราะประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ลดลงตามรอบการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อนำมาใช้ซ้ำ เจลชนิดดังกล่าวเริ่มจับตัวเป็นก้อน ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์จึงลดลงตามไปด้วย



## บทที่ 5

### สรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

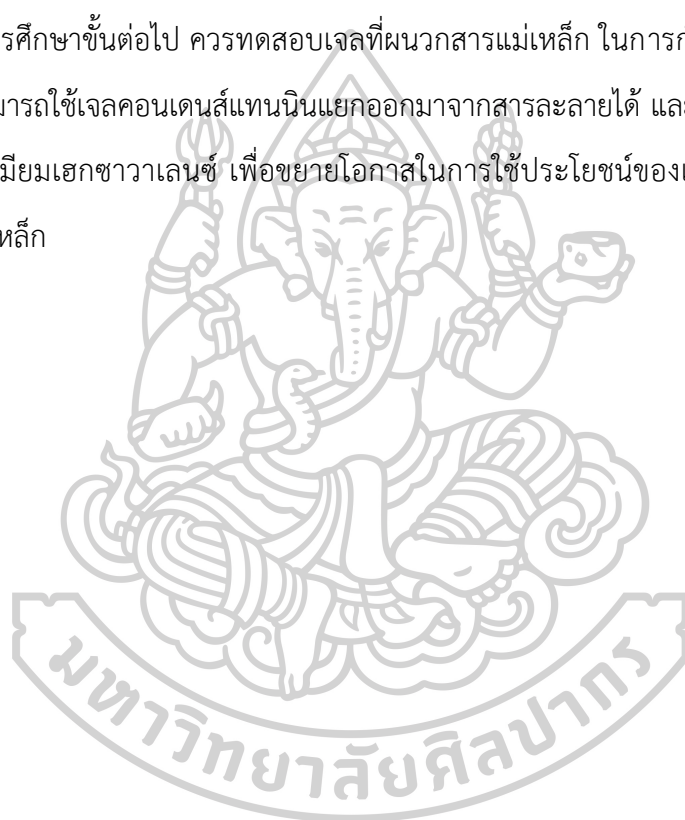
จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกสารแม่เหล็กที่เตรียมขึ้นนี้อยู่ที่ 120 นาที โดยการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ หรือสามารถกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้หมดที่ระยะเวลาดังกล่าว พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์และพีเอชที่สารแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุด คือพีเอช 1.0 ที่พีเอชดังกล่าวสามารถเกิดการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้สูงที่สุดถึง 99.46% เนื่องจากสภาวะกรด จะมีโปรตอนจำนวนมาก ส่งผลต่อกลไกการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ของเจลคอนเดนส์แทนนินในขั้นตอนที่ (1) ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของโครเมตด้วยโมเลกุลของแทนนิน ส่งผลให้ขั้นตอนที่ (2) การรีดิวซ์โครเมียมเฮกซาวาเลนซ์เป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ (3) การสร้างหมู่คาร์บอกซิลด้วยการออกซิเดชันของโมเลกุลแทนนิน และ (4) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ด้วยหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามลำดับ ทำให้เกิดการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ได้ดีที่สภาวะพีเอชต่ำ โดยพบว่าคอนเดนส์แทนนินมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายได้เป็นอย่างดี และจากการเพิ่มศักยภาพการใช้งานของเจลคอนเดนส์แทนนินในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ โดยเพิ่มคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กเพื่อให้ใช้งานได้สะดวก และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ พบว่าประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับแม่เหล็กที่ตรึงไว้บนคอนเดนส์แทนนินกลับมาใช้ใหม่นั้น สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ไม่น้อยกว่า 5 รอบ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในแต่ละรอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์และแมงกานีสเฟอร์ไรท์

ดังนั้นโดยสรุปแล้ว การผนวกสารแม่เหล็กชนิดเหล็กออกไซด์และแมงกานีสเฟอร์ไรท์ลงในเจลคอนเดนส์แทนนิน ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำเจลคอนเดนส์แทนนินกลับมาใช้ซ้ำได้ไม่น้อยกว่า 5 รอบ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในสารละลายพีเอช 1.0 ยังคงที่ ทั้งนี้ความสามารถในการกำจัดดังกล่าวเกิดขึ้นโดยการทำงานของแทนนิน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์แปรผันกับสภาวะพีเอชของสารละลาย โดย

ความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนต์ ในสารละลายพีเอช 1.0 สูงถึง 99.46% ภายในระยะเวลา 120 นาที ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับที่สูงมาก การผนวกสารแม่เหล็กเข้ากับเจลคอนเดนส์แทนนิน จึงทำให้การแยกเจลคอนเดนส์แทนนินออกมาใช้ซ้ำทำได้ง่าย รวดเร็ว ลดอันตรายจากการสัมผัสกับกรดอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาขั้นต่อไป ควรทดสอบเจลที่ผนวกสารแม่เหล็ก ในการกำจัดโลหะหนักอื่นๆ ที่มีรายงานว่าสามารถใช้เจลคอนเดนส์แทนนินแยกออกมาจากสารละลายได้ และทดสอบกับน้ำเสียจริงที่ปนเปื้อนโครเมียมเฮกซวาเลนต์ เพื่อขยายโอกาสในการใช้ประโยชน์ของเจลคอนเดนส์แทนนินที่ผนวกสารแม่เหล็ก



## รายการอ้างอิง

- Ahalya, N., Ramachandra, T. V., & Kanamadi, R. D. (2003). Biosorption of heavy metals. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 7(4), 71–79.
- Air Resources Board. (1997). *Determination of total chromium and hexavalent chromium emissions from stationary sources*. Retrieved Aug 10, 2017, from [https://www.arb.ca.gov/testmeth/vol3/M\\_425.pdf](https://www.arb.ca.gov/testmeth/vol3/M_425.pdf)
- Aoki, T., & Munemori, M. (1982). Recovery of Cr (VI) from wastewater with Iron (III) Hydroxide: I. Adsorption mechanism of Cr (VI) on Iron (III) hydroxide. *Water Research*, 16, 793–796. doi:10.1016/0043-1354(82)90006-9.
- APHA, (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.). American Public Health Association, Washington, DC, pp. 3-65-3-68.
- Bacelo, H. A. M., Santos, S. C. R., & Botelho, C. M. S. (2016). Tannin-based biosorbents for environmental applications - A review. *Chem. Eng. J.*, 303, 575-587.
- Bachan, N., Asha, A., Jeyarani, W. J., Kumar, D. A., & Shyla, J. M. (2015). A comparative investigation on the structural, optical and electrical properties of SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> core-shell nanostructures with their single components. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 28(11), 1317-1325.
- Bagheri, H., Afkhami, A., Saber-Tehrani, M., & Khoshsafar, H. (2012). Preparation and characterization of magnetic nanocomposite of Schiff base/silica/magnetite as a preconcentration phase for the trace determination of heavy metal ions in water, food and biological samples using atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 97, 87-95.
- Brown, P., & Hope-Weeks, L. J. (2009). The synthesis and characterization of zinc ferrite aerogels prepared by epoxide addition. *J. Sol-Gel Sci. Technol*, 51, 238-243.
- Brown, P. A., Gill, S. A., & Allen, S. J. (2000). Metal removal from wastewater using peat. *Water Research*, 34(16), 3907–3916. doi:10.1016/S0043–1354(00)00152–4.
- Candela, M. P., Martinez, J. M., & Macia, R. T. (1995). Chromium (VI) removal with activated carbons. *Water Research*, 29(9), 2174–2180. doi:10.1016/0043–1354(95)00035-J.

- Chaiyasith, S., Chaiyasith, P., & Septhu, C. (2006). Removal of cadmium and nickel from aqueous solution by adsorption onto treated fly ash from Thailand. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 11(2), 13–20.
- Cong, H. P., Ren, X. C., Wang, P., & Yu, S. H. (2012). Macroscopic multifunctional graphene-based hydrogels and aerogels by a metal ion induced self-assembly process. *ACS Nano*, 6(3), 2693-2703.
- Dakiky, M., Khamis, M., Manassra, A., & Mer'eb, M. (2002). Selective adsorption of Cr(VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents. *Advances in Environmental Research*, 6(4), 533–540. doi:10.1016/S1093–0191(01)00079-X.
- Demiral, H., Demiral, I., Tumsek, F., & Karabacakoglu, B. (2008). Adsorption of chromium(VI) from aqueous solution by activated carbon derived from olive bagasse and applicability of different adsorption models. *Chemical Engineering Journal*, 144, 188-196.
- Devi, E. C., & Soibam, I. (2017). Structural and optical characterization of MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles *Advanced Materials Proceedings*, 2(2), 93-96.
- Gardea-Torresdey, J. L., de la Rosa, G., & Peralta-Videa, J. R. (2004). Use of phytofiltration technologies in the removal of heavy metals: A review. *Pure and Applied Chemistry*, 76(4), 801–813.
- Gokul Raja, T. S., Sreenija, S. V., & Balamurugan, S. (2015). Eco-friendly synthesized nanocrystalline CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> materials by molten salt flux method. *AIP conference proceedings*, 050174-050171–050174-050173.
- Gui, X., Zeng, Z., Lin, Z., Gan, Q., Xiang, R., Zhu, Y., . . . Tang, Z. (2013). Magnetic and highly recyclable macroporous carbon nanotubes for spilled oil sorption and separation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 5845-5850.
- Gupta, V. K., Morhan, D., Sharma, S., & Park, K. T. (1999). Removal of chromium(VI) from electroplating industry wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste material. *Environmentalist*, 19(2), 129–136.
- Gurung, M., Adhikari, B. B., Morisada, S., Kawakita, H., Inoue, K., & Alam, S. (2013). N-aminoguanidine modified persimmon tannin: A new sustainable material for selective adsorption, preconcentration and recovery of precious metals from

- Bioresource Technology acidic chloride solution. *Bioresource Technology*, 129, 108-117.
- Hamadi, N. K., Chen, X. D., Farid, M. M., & Lu, M. G. Q. (2001). Adsorption kinetics for the removal of chromium(VI) from aqueous solution by adsorbents derived from used tyres and sawdust. *Chemical Engineering Journal*, 84(2), 95-105.
- Houshiar, M., Zebhi, F., Razi, Z. J., Alidoust, A., & Askari, Z. (2014). Synthesis of cobalt ferrite (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles using combustion, coprecipitation, and precipitation methods: a comparison study of size, structural, and magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 371, 43-48.
- Huang, C. P., & Wu, M. H. (1975). Chromium removal by carbon adsorption. *J. Water Pollut. Control Federation*, 47(10), 2437-2446.
- Inoue, K., Paudyal, H., Nakagawa, H., Kawakita, H., & Ohto, K. (2010). Selective adsorption of chromium(VI) from zinc(II) and other metal ions using persimmon waste gel. *Hydrometallurgy*, 104, 123-128.
- Jabeen, H., Kemp, K. C., & Chandra, V. (2013). Synthesis of nano zerovalent iron nanoparticles - graphene composite for the treatment of lead contaminated water. *J. Environ. Manage*, 130, 429-435.
- Khanbabaee, K., & van Ree, T. (2001). Tannins: classification and definition. *Natural product reports*, 18(6), 641-649.
- Kharissova, O. V., Rasika Dias, H. V., & Kharisov, B. I. (2015). Magnetic adsorbents based on micro- and nanostructured materials. *The Royal Society of Chemistry*, 5, 6695-6719.
- Krause, D. O., Smith, W. J., Brooker, J. D., & McSweeney, C. S. (2005). Tolerance mechanisms of streptococci to hydrolysable and condensed tannins. *Animal feed science and technology*, 121(1), 59-75.
- Lazarevic, Z., Jovalekic, C., Milutinovic, A., Romcevic, M., & Romcevic, N. (2012). Preparation and characterization of nano ferrites. *Acta Physica Polonica, A*, 121(3).
- Liang, H., & Wang, Z. (2010). Adsorption of bovine serum albumin on functionalized silica-coated magnetic MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 124(2), 964-969.

- Lin, Y. F., & Chang, C. Y. (2014). Magnetic mesoporous iron oxide/carbon aerogel photocatalysts with adsorption ability for organic dye removal. *RSC Adv*, 4, 28628-28631.
- Liu, S., Yan, Q., Tao, D., Yu, T., & Liu, X. (2012). Highly flexible magnetic composite aerogels prepared by using cellulose nanofibril networks as templates. *Carbohydr. Polym*, 89, 551-557.
- Maaz, K., Mumtaz, A., Hasanain, S., & Ceylan, A. (2007). Synthesis and magnetic properties of cobalt ferrite (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles prepared by wet chemical route. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 308(2), 289-295.
- Nakajima, A., & Baba, Y. (2004). Mechanism of hexavalent chromium adsorption by persimmon tannin gel. *Water Research*, 38(12), 2859-2864.
- Nakano, Y., Takeshita, K., & Tsutsumi, T. (2001). Adsorption mechanism of hexavalent chromium by redox within condensed-tannin gel. *Water Research*, 35(2), 496-500.
- Namasivayam, C., & Ranganathan, K. (1993). Waste Fe(III)/Cr(III) hydroxide as adsorbent for the removal of Cr(VI) from aqueous solution and chromium plating industry wastewater. *Environmental Pollution*, 82(3), 255-261.
- Natale, F. D., Lancia, A., Molino, A., & Musmarra, D. (2007). Removal of chromium ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon and char. *Journal of Hazardous Materials*, 145(3), 381-390.
- Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W., & Baroutian, S. (2008). Removal of Hexavalent Chromium-Contaminated Water and Wastewater: A Review. *Water Air Soil Pollut.* doi:10.1007/s11270-008-9893-7
- Pandey, P., Sharma, S., & Sambhi, S. (2010). Kinetics and equilibrium study of chromium adsorption on zeolite NaX. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(2), 395-404.
- Park, S. J., & Jung, W. Y. (2001). Removal of chromium by activated carbon fibers plated with copper metal. *Carbon Science*, 2(1), 15-21.



- Pradhan, J., Das, S. N., & Thakur, R. S. (1999). Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by using activated RedMud. *Journal of Colloid and Interface Science*, 217(1), 137–141.
- Rahmayeni, Syukri, A., Novesar, J., Emriadi, & Yeni, S. (2017). Magnetically separable ZnO-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites synthesized in organic-free media for dye degradation under natural sunlight. *Oriental journal of chemistry*, 33(6), 2758-2765.
- Rodrigues, L. A., Sakane, K. K., Nunes Simonetti, E. A., & Thim, G. P. (2015). Cr total removal in aqueous solution by PHENOTANAP based tannin gel (TFC). *J. Environ. Chem. Eng*, 3, 725–733.
- Sakaguchi, T., & Nakajima, A. (1987). Recovery of uranium from seawater by immobilized tannin. *Separation Science and Technology*, 22(6), 1609-1623.
- Selomulya, C., Meeyoo, V., & Amat, R. (1999). Mechanisms of Cr(VI) removal from water by various types of activated carbons. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 74(2), 111-122.
- Sharma, D. C., & Forster, C. F. (1993). Removal of hexavalent chromium using sphagnum moss peat. *Water Research*, 27(7), 1201-1208.
- Sharma, D. C., & Forster, C. F. (1996). Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by granular activated carbon. *Water S.A.*, 22(2), 153–160.
- Srivastava, S. K., Pant, N., & Pal, N. (1987). Studies on the efficiency of a local fertilizer waste as a low cost adsorbent. *Wat. Res*, 21(11), 1389–1394.
- Tamirat, D., Khalid, S., & Shimeles, A. K. (2014). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution using chemically activated carbon prepared from locally available waste of bamboo (*oxytenanthera abyssinica*). *ISRN Environmental Chemistry*, 1-9.
- Unob, F., Wongsiri, B., Phaeon, N., Puanggam, M., & Shiowatana, J. (2006). *Reuse of waste silica as adsorbent for metal removal by modifying with iron oxide*. Chulalongkorn University.
- Volesky, B. (2001). Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, 59(2-3), 203-216.

- Yamaguchi, H., Higasida, R., Higuchi, M., & Sakata, I. (1992). Adsorption mechanism of heavy-metal ion by microspherical tannin resin. *Journal of applied polymer science*, 45(8), 1463-1472.
- Yurtsever, M. I., & Sengil, A. (2009). Biosorption of Pb(II) ions by modified quebracho tannin resin. *J. Hazard. Mater*, 163, 58-64.
- Zhan, X. M., & Zhao, X. (2003). Mechanism of lead adsorption from aqueous solutions using an adsorbent synthesized from natural condensed tannin. *Water Research*, 37, 3905-3912.
- Zhang, B., Xing, J. M., Lang, Y. Q., & Liu, H. Z. (2008). Synthesis of amino-silane modified magnetic silica adsorbents and application for adsorption of flavonoids from glycyrrhiza uralensis. *Fisch. Sci. China Ser. B. Chem*, 51(2), 145-151.
- Zi, Z., Sun, Y., Zhu, X., Yang, Z., Dai, J., & Song, W. (2009). Synthesis and magnetic properties of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(9), 1251-1255.
- จิระฉัตร ศรีแสน. (ม.ป.ป.). ผลกระทบของโครเมียมและสารประกอบโครเมียมต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 60(189), 10-12.
- บุญยงช บัญไสย, อรวรรณ สุขสมบัติ และปิยะพร ณ หนองคาย. (2557). การสังเคราะห์และวิเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กเคลือบด้วยพีเอ็มเอเอ็มพีซี โคพอลิเมอร์. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6 วันที่ 20-21 มีนาคม พ.ศ. 2557*, 414-421.
- ประกร รามกุล. (2553). นวัตกรรมตัวดูดซับแทนนินในการแยกโลหะจากสารละลาย. *วิศวกรรมสาร มก.*, 23(72), 17-29.
- พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์, และวีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์. (2553). การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 27(4), 61-66.



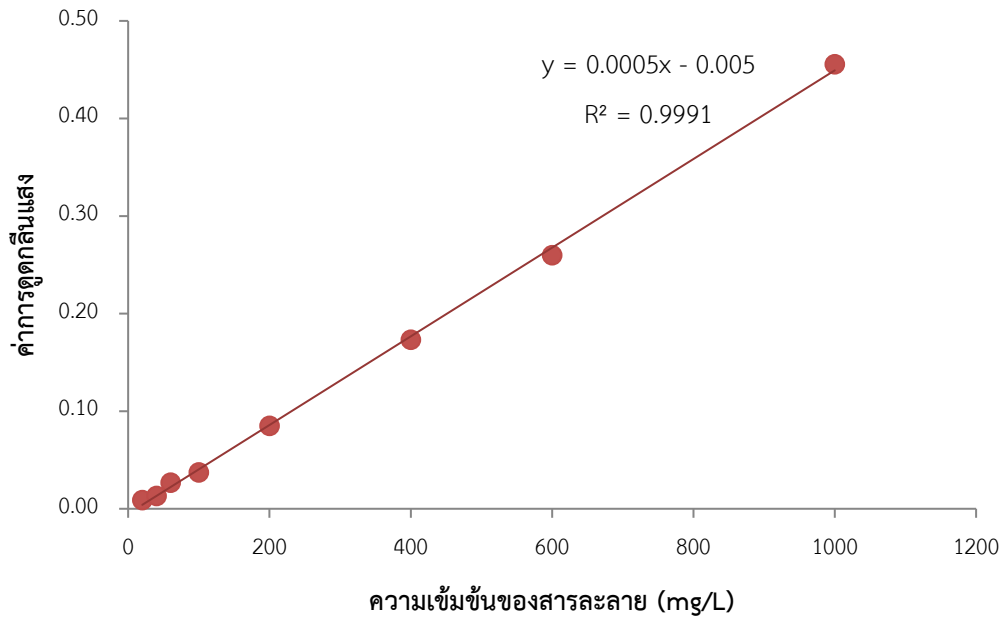
รูปที่ ก1 แสดงลักษณะคอนเดนส์แทนนินก่อนและหลังบด



ตารางที่ ก1 ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย
20	0.0091	0.0087	0.0089	0.0089
40	0.0136	0.0131	0.0124	0.0130
60	0.0257	0.0276	0.0266	0.0266
100	0.0391	0.0325	0.0400	0.0372
200	0.0857	0.0847	0.0842	0.0849
400	0.1594	0.2016	0.1588	0.1733
600	0.2712	0.2576	0.2508	0.2599
1,000	0.4566	0.4575	0.4523	0.4555

รูปที่ ก2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ ก3 แสดงลักษณะของสี ของการทำปฏิกิริยาของไดฟีนิลคาร์บาไซด์กับโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ที่ระยะเวลา 120 นาที



วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (% Remove)

$$\% \text{ Remove} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสารละลายชุดควบคุม} - \text{ตัวอย่าง}}{\text{ความเข้มข้นของสารละลายชุดควบคุม}}$$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุพรรณษา คณา
วัน เดือน ปี เกิด	27 กรกฎาคม 2534
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2559 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	42/1 หมู่ 4 ตำบลสวนป่า อำเภอมะเขี จังหวัดนครปฐม 73000 E-mail address: <a href="mailto:suphansakana@gmail.com">suphansakana@gmail.com</a>

