

การดูดซับและการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนจากน้ำเสียชุบโลหะ
ด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์



นางสาวเกศกนก แซ่อิง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**ADSORPTION AND RECOVERY OF NICKEL AND
CHROMIUM FROM ELECTROPLATING WASTEWATER
USING ACTIVATED CARBON FROM
WASTE RUBBER TIRES**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Environmental Pollution and Safety**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การดูดซับและการนำ निकิล และ โครเมียม กลับคืนจากน้ำเสียชุบโลหะ
ด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้ นวัตกรรมฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศ เชื้อสุวรรณ)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิราภรณ์ โพธิ์วิชานนท์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ รัตนพานิ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(อาจารย์ ดร.ชลาลัย หาญเจนลักษณ์)

คณบดีสำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์

เกศกนก แซ่อึ้ง : การดูดซับและการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนจากน้ำเสียชุบโลหะ
ด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ (ADSORPTION AND RECOVERY OF NICKEL AND
CHROMIUM FROM ELECTROPLATING WASTEWATER USING ACTIVATED
CARBON FROM WASTE RUBBER TIRES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.สิราภรณ์ โพธิวิชยานนท์, 177 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมใน
น้ำเสียชุบโลหะด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยความร้อน นำมา
ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) เทคนิค Energy Dispersive X-ray
spectrometry (EDX) พบว่าลักษณะพื้นผิวหลังกระตุ้นมีความเป็นระเบียบ มีรูพรุนเพิ่มขึ้น
เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนแบล็ค มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 80 ลักษณะ
เนื้อสาร (Texture) ของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ
(BET) พบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 149.74 ตร.ม./ก.
และ 1.05 ลบ.ซม./ก. ตามลำดับ ซึ่งเป็นรูพรุนประเภทขนาดกลาง (Mesoporous) ถ่านกัมมันต์
สามารถดูดซับสารละลายไอโอดีนได้ 1,506.13 มก./ก. และมีค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ
0.73 ก./ลบ.ซม. คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ถ่านกัมมันต์ประเภทผง จากนั้นทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี
ความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมอย่างละ 10 มก./ล. พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่ค่าความ
เป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที และปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 กรัม ถ่านกัม
มันต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 50 และ 99.99
ตามลำดับ โดยการดูดซับสามารถพิสูจน์ได้จากแสงเมียร์ไอโซเทอร์มกับค่าสัมประสิทธิ์
สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ซึ่งนิกเกิลและโครเมียมมีค่าเท่ากับ 0.94 และ 0.99
ตามลำดับ และพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุบ
โลหะด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ ที่อัตราการไหล 0.5 มล./นาที มีประสิทธิภาพมากที่สุด
โดยสามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 ถ่านกัมมันต์
ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ซ้ำได้หลังจากถูกสกัดด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ซึ่ง
สามารถนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนจากถ่านกัมมันต์ได้ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 80

สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา เกศกนก แซ่อึ้ง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สิราภรณ์

KETKANOK SAEUANG : ADSORPTION AND RECOVERY OF NICKEL
AND CHROMIUM FROM ELECTROPLATING WASTEWATER USING
ACTIVATED CARBON FROM WASTE RUBBER TIRES. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. SIRAPORN POTIVICHAYANON, Ph.D., 177 PP.

CARBON BLACK/ ACTIVATED CARBON/ ADSORPTION/ RECOVERY/
NICKEL/ CHROMIUM/ ELECTROPLATING WASTEWATER

The objectives of this research were to investigate the removal efficiency of nickel and chromium in electroplating wastewater by activated carbon derived from waste rubber tires. The waste rubber tires were activated by heating in which case the activated carbon was studied the physicochemical properties by a field emission scanning electron microscope (FE-SEM) with energy dispersive X-ray spectrometry technique. The results showed the surface was regulated and the porous was increased when compared with carbon black. The energy dispersive X-ray spectrometry spectrum showed carbon more than 80%. The texture of activated carbon was analyzed by Brunauer Emmett Teller (BET) and found that the surface area and total pore volume were improved to 149.74 m²/g and 1.05 cm³/g, respectively. The total pore volume showed in mesoporous. The activated carbon adsorbed iodine solution up to 1,506.13 mg/g and density appears results revealed at 0.73 g/cm³ which the property of activated carbon was in Thai Industrial Standard. The optimum conditions of adsorption in mixed aqueous solution containing 10 mg/l for each nickel and chromium were pH at 5, 30 min of contact time and 3 g of adsorbent dosage. These showed the activated carbon adsorbed nickel and chromium more than 50% and 99.99% of efficiency, respectively.

In addition, this adsorption process could be proved by Langmuir model with correlation coefficient of nickel and chromium at 0.94 and 0.99, respectively and then the activated carbon was used to adsorb nickel and chromium in electroplating wastewater by dual packed bed column system. It was found that the optimum flow rate was 0.5 ml/min which adsorbed nickel and chromium more than 90% of efficiency. This activated carbon could be reused after extraction using 1 M of nitric acid solution which nickel and chromium could be recovered more than 80% of efficiency.



School of Environmental health and safety

Academic year 2018

Student's Signature กตกรก แสงอึ้ง

Advisor's Signature วิไล น.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา และคณาจารย์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ เป็นอย่างยิ่ง ทั้งในด้านการดำเนินงานวิจัย และด้านวิชาการความรู้ อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิราภรณ์ โพธิวิชยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศ เชื้อสุวรรณ อาจารย์ประจำสาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ รัตนพานิ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คณาจารย์ประจำสาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์

ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย พร้อมทั้งอุตสาหกรรมผลิตปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมหุบโลหะ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ตัวอย่างคาร์บอนแบล็ค และน้ำเสียหุบโลหะ เพื่อการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยทุกคนที่ให้อำลัใจ และให้คำปรึกษาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

เกษกนก แซ่อึ้ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัย (Conceptual Framework).....	4
2 ปฏิสัมพันธ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อุดสาหกรรมหุบไลหะ.....	5
2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมหิวขึ้นงาน.....	5
2.1.1.1 ขั้นตอนการหัดหิวขึ้นงาน.....	5
2.1.1.2 ขั้นตอนการล้างหิวมันด้วยค่าง.....	5
2.1.1.3 ขั้นตอนการกำหัดสนิมด้วยกรด.....	5
2.1.2 ขั้นตอนการหุบไลหะ.....	6
2.1.2.1 ขั้นตอนการหุบนิกเกิด.....	6
2.1.2.2 ขั้นตอนการหุบโครเมียม.....	6
2.1.2.3 ขั้นตอนการหุบฮาร์โครม.....	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.2.4	ขั้นตอนการชุบทองแดง	6
2.1.2.4.1	การชุบทองแดงแบบต่าง	6
2.1.2.4.2	การชุบทองแดงแบบกรด	6
2.1.3	ขั้นตอนการล้าง	7
2.1.4	ขั้นตอนการอบแห้ง	8
2.2	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ	8
2.3	โลหะหนัก	9
2.3.1	นิเกิล	10
2.3.2	โครเมียม	10
2.3.3	แคดเมียม	11
2.3.4	ทองแดง	11
2.3.5	ตะกั่ว	11
2.3.6	สังกะสี	11
2.4	วิธีการกำจัดโลหะหนัก.....	12
2.4.1	การสร้างตะกอนและรวมตะกอน	12
2.4.2	การใช้สารเคมีในการตกตะกอน.....	13
2.4.3	การแลกเปลี่ยนไอออน	13
2.4.4	การกรองผ่านเยื่อกรอง	13
2.4.5	การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี.....	13
2.4.6	การดูดซับ	14
2.4.6.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการดูดซับ	15
2.4.6.2	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	16
2.4.6.2.1	แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม	16
2.4.6.2.2	ฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม	17
2.4.6.3	กลไกการดูดซับ	18
2.4.6.3.1	การดูดซับทางกายภาพ.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.6.3.2 การดูดซับทางเคมี.....	19
2.5 ยางรถยนต์.....	20
2.5.1 องค์ประกอบยางรถยนต์.....	20
2.5.2 กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน.....	21
2.5.3 การไพโรไลซิสยางรถยนต์.....	22
2.5.3.1 คาร์บอนแบล็ค.....	22
2.5.3.2 คุณสมบัติคาร์บอนแบล็คยางรถยนต์.....	23
2.5.3.3 หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์.....	23
2.6 ถ่านกัมมันต์.....	24
2.6.1 การกระตุ้น.....	27
2.6.2 ลักษณะรูพรุน.....	28
2.6.3 คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์.....	28
2.6.4 ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	32
2.6.4.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทผง.....	32
2.6.4.2 ถ่านกัมมันต์ประเภทเกล็ด.....	33
2.6.4.3 ถ่านกัมมันต์ประเภทแท่ง.....	33
2.7 ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon; PAC) ในการบำบัด.....	34
2.7.1 ระบบตะกอนเร่ง.....	34
2.7.1.1 พารามิเตอร์ระบบตะกอนเร่ง.....	34
2.7.2 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ.....	35
2.7.2.1 ระบบตัวกลางลอยตัวแบบใช้อากาศ.....	35
2.7.3 ระบบคอลัมน์.....	35
2.7.3.1 ระบบคอลัมน์แบบการดูดซับ.....	36
2.7.3.2 พารามิเตอร์ระบบคอลัมน์แบบการดูดซับ.....	38
2.7.3.3 ข้อดีข้อเสียของระบบคอลัมน์.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8	การวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS)	39
2.9	การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยแสงซินโครตรอน	40
2.10	การนำโลหะหนักกลับคืน (Recovery)	43
2.11	การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ (Regeneration)	45
2.12	มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขต ประกอบการอุตสาหกรรม.....	45
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
3.1	เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	48
3.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	48
3.1.2	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	49
3.2	การเตรียมถ่านกัมมันต์.....	50
3.3	การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์	50
3.3.1	คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)	51
3.3.1.1	การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology)	51
3.3.1.2	การศึกษาลักษณะเนื้อสาร (Texture)	52
3.3.2	คุณสมบัติทางเคมี (Chemical property)	53
3.3.2.1	การศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)	53
3.4	การศึกษาสภาวะในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม ของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากยางรถยนต์	56
3.4.1	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	56
3.4.2	การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ	56
3.5	การศึกษาการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุบโลหะ.....	57
3.5.1	การวิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโครเมียม	57
3.5.2	การศึกษาการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุบโลหะของถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์.....	57
3.5.3	การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.4 การศึกษาธาตุองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ด้วยแสงซินโครตรอน	60
3.6 การศึกษาสารสกัดที่เหมาะสมในการนำ निकิลและโครเมียมกลับคืน	61
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล.....	63
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์	63
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)	64
4.1.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	64
4.1.1.2 ลักษณะพื้นผิว	68
4.1.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)	69
4.1.2.1 ความสามารถในการดูดซับ	69
4.1.2.1.1 การดูดซับสารละลายไอโอดีน	69
4.1.2.1.2 ความหนาแน่นปรากฏ.....	70
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ निकิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากยางรถยนต์	71
4.2.1 การศึกษาค่าความเป็นกรดด่าง (pH)	71
4.2.2 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัส (Contact time)	73
4.2.3 การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์	74
4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	78
4.4 การศึกษาการดูดซับ निकิลและโครเมียมในน้ำเสียชุบโลหะของถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์.....	82
4.5 การบำบัด निकิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่	83
4.5.1 ผลของอัตราการไหลของระบบที่เหมาะสม	83
4.5.2 ผลการบำบัด निकิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่.....	94
4.5.3 ผลการศึกษาสารสกัดที่เหมาะสมในการนำ निकิลและโครเมียมกลับคืน.....	96
4.5.4 ผลการบำบัดนำ निकิลและโครเมียมด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์ซ้ำ.....	97
4.6 การศึกษาคุณภาพน้ำเสียชุบโลหะและน้ำทิ้ง	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1	สรุปผลงานวิจัย	107
5.1.1	การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์	107
5.1.2	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียม	108
5.1.3	การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบเพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่	108
5.1.4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับซ้ำของถ่านกัมมันต์	109
5.2	ข้อเสนอแนะจากการศึกษาวิจัย.....	109
	รายการอ้างอิง	121
	ภาคผนวก	130
	ภาคผนวก ก. การเตรียมสารละลาย.....	121
	ภาคผนวก ข. วิธีการวิเคราะห์	124
	ภาคผนวก ค. กราฟมาตรฐาน	126
	ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวและองค์ประกอบของคาร์บอนแบล็ค และถ่านกัมมันต์ (FE-SEM/EDX) รุ่น AURIGA.....	129
	ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของคาร์บอนแบล็ค และถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (BET) รุ่น Bel sorp mini 11	140
	ภาคผนวก ฉ. ค่าการดูดกลืนแสง	143
	ภาคผนวก ช. ภาพการทดลอง	157
	ประวัติผู้เขียน	177

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ9
2.2	การใช้ทรัพยากรในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมชุบโลหะ9
2.3	มาตรฐานระดับการปนเปื้อนสูงสุด (Maximum contaminant level: MCL) สำหรับความเป็นอันตรายของโลหะหนัก.....12
2.4	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย19
2.5	องค์ประกอบของรถยนต์.....20
2.6	คุณสมบัติของคาร์บอนแบล็คจากยางรถยนต์23
2.7	หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ24
2.8	พันธะของหมู่ฟังก์ชัน25
2.9	ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับ.....26
2.10	คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์.....32
2.11	ลักษณะของถ่านกัมมันต์ประเภทผงที่มีในท้องตลาด33
2.12	การใช้ถ่านกัมมันต์ทางด้านน้ำ.....33
2.13	พารามิเตอร์ระบบคอลลิมน์แบบการดูดซับ38
2.14	ข้อดีและข้อเสียของวิธีการของระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC)39
2.15	ค่าพลังงานที่ถูกปลดปล่อย43
2.16	ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการนำโลหะหนักกลับคืน44
2.17	สารเคมีหรือสารสกัดที่ใช้ในการนำโลหะหนักกลับคืน44
2.18	มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขต ประกอบการอุตสาหกรรม45
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย48
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย49
3.3	พารามิเตอร์ในการทดลองการดูดซับนิกเกิลและโครเมียม59
4.1	ธาตุองค์ประกอบของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์67
4.2	ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 ความสามารถในการดูดซับสารละลายไอโอดีน	69
4.4 ความหนาแน่นปรากฏ	70
4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล.....	76
4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับ โครเมียม.....	77
4.7 ค่าสหสัมพันธ์ถดถอย (correlation coefficient: R ²) ของไอโซเทอร์ม.....	82
4.8 ระยะเวลาในการสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	83
4.9 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นและหลังการดูดซับที่อัตราการไหล แตกต่างกัน	86
4.10 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับในอัตราการไหลที่แตกต่างกัน	87
4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและ โครเมียมในอัตราการไหลที่แตกต่างกัน..	87
4.12 ธาตุองค์ประกอบ	92
4.13 ปริมาณนิกเกิลและ โครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์.....	94
4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและ โครเมียม	95
4.15 ประสิทธิภาพการนำโลหะหนักกลับคืนด้วยกรดต่าง	96
4.16 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลและ โครเมียมหลังการนำโลหะหนักกลับคืน.....	98
4.17 ปริมาณนิกเกิลและ โครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ซ้ำ.....	98
4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและ โครเมียมด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ซ้ำ	100
4.19 คุณลักษณะของน้ำเสียหุบ โลหะก่อนและหลังออกจากระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่	106

สารบัญรูป

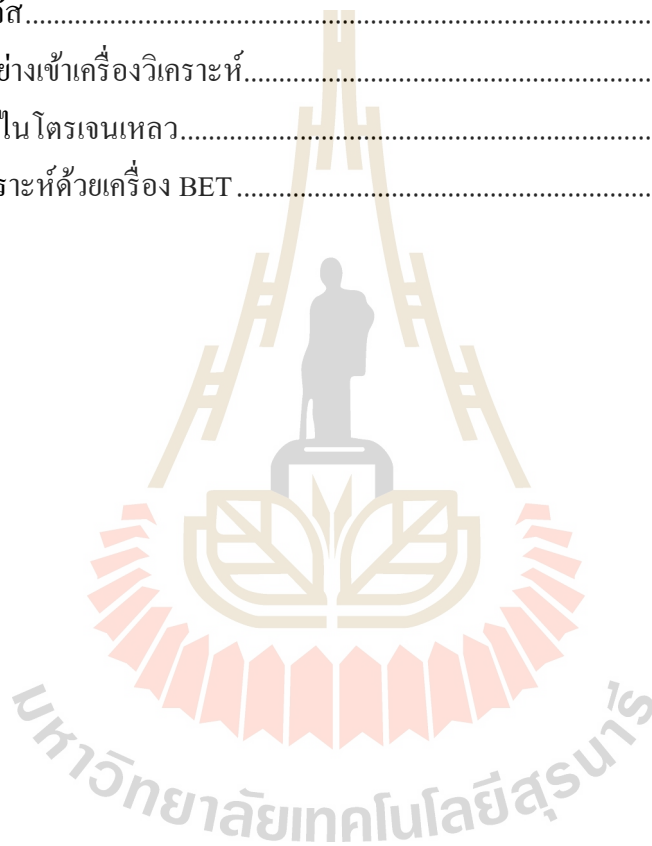
รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการผลิตของอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยการชุบนิเกิล.....7
2.2	กลไกการดูดซับ.....15
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง X/m และ C_e16
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง C_s/Q กับ C_e17
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$18
2.6	การเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ21
2.7	การกำจัดและการใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว22
2.8	หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์.....25
2.9	SEM ของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ผ่านการดูดซับ โลหะหนัก.....30
2.10	ไอโซเทิร์ของการดูดซับ.....31
2.11	ระบบตะกอนเร่ง.....35
2.12	ระบบคอลัมน์.....36
2.13	แบบชั้นตรึง.....37
2.14	แบบชั้นเคลื่อนที่.....37
2.15	แบบชั้นฟลูอิดไดซ์.....38
2.16	X-ray fluorescence.....41
2.17	ส่วนประกอบของระบบลำเลียงแสงที่ 6.....42
2.18	สถานีทดลอง Micro X-ray43
3.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM).....52
3.2	เครื่อง BET53
3.3	ระบบแพ็คเกจคอลัมน์แบบคู่.....59
3.4	การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยแสงซินโครตรอน61
4.1	โครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....65
4.2	ปริมาณการดูดซับนิเกิลและโครเมียมที่ค่าความเป็นกรดต่างกัน.....73
4.3	ประสิทธิภาพในการดูดซับนิเกิลและโครเมียมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของนิกเกิล.....	79
4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับของโครเมียม.....	80
4.6 การดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของนิกเกิล.....	80
4.7 การดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของโครเมียม.....	81
4.8 การดูดซับแบบฟรุนดลิชไอโซเทอร์มของนิกเกิล.....	81
4.9 การดูดซับแบบฟรุนดลิชไอโซเทอร์มของโครเมียม.....	82
4.10 ปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับที่อัตราการใช้ไหลแตกต่างกัน.....	89
4.11 ปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับที่อัตราการใช้ไหลแตกต่างกัน.....	90
4.12 ค่า X-rays Fluorescence counts ของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์.....	92
4.13 ค่า X-rays Fluorescence counts ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก.....	92
4.14 ค่า X-rays Fluorescence counts แต่ละจุดของนิกเกิลจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก.....	93
4.15 ค่า X-rays Fluorescence counts แต่ละจุดของโครเมียมจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก.....	93
4.16 การเปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่นำนิกเกิลหนักกลับคืนแล้ว.....	102
4.17 การเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่นำโครเมียมกลับคืนแล้ว.....	103
4.18 ปริมาณการดูดซับนิกเกิล.....	104
4.19 ปริมาณการดูดซับโครเมียม.....	105
ก.1 กราฟสารละลายมาตรฐานนิกเกิล.....	127
ก.2 กราฟสารละลายมาตรฐานโครเมียม.....	128
ข.1 บ่อเก็บน้ำเสีย.....	157
ข.2 การฟักตัวอย่างน้ำเสีย.....	157
ข.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น.....	157
ข.4 การเก็บรักษาตัวอย่าง.....	157
ข.5 การกระตุ้นถ่านด้วยการเผา.....	158

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.6 การล้างถ่านด้วย H_2O_2	158
ช.7 การซังน้ำหนักถ่านกัมมันต์.....	158
ช.8 ไนโตรเจนเหลว.....	158
ช.9 การดีแก๊ส.....	159
ช.10 เอาตัวอย่างเข้าเครื่องวิเคราะห์.....	159
ช.11 การเติมไนโตรเจนเหลว.....	159
ช.12 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET.....	159



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Cr ³⁺	หมายถึง	ไตรวาเลนต์โครเมียม
Cr ⁶⁺	หมายถึง	เฮกซะวาเลนต์โครเมียม
%	หมายถึง	ร้อยละ
N.D.	หมายถึง	Not detected
SD	หมายถึง	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
MCL	หมายถึง	Maximum contaminant level
H ⁺	หมายถึง	โปรตรอน
H ^{3O} ⁺	หมายถึง	ไฮโดรเนียมไอออน
OC	หมายถึง	องศาเซลเซียส
Cm	หมายถึง	เซนติเมตร
pH	หมายถึง	ค่าความเป็นกรดต่าง
NTU	หมายถึง	Nephelometric turbidity units
ADMI	หมายถึง	American dye manufacturers institute
m ² /g	หมายถึง	ตารางเมตรต่อกรัม
Cm ³ /g	หมายถึง	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
%wt	หมายถึง	ร้อยละโดยน้ำหนัก
J/g-K	หมายถึง	จูลต่อกรัมเคลวิน
W/m-K	หมายถึง	วัตต์ต่อเมตรเคลวิน
μm ²	หมายถึง	ไมโครตารางเมตร
eV	หมายถึง	อิเล็กตรอน โวลต์
K α	หมายถึง	ระดับชั้นพลังงาน
K β	หมายถึง	ระดับชั้นพลังงาน
มก./ก.	หมายถึง	มิลลิกรัมต่อกรัม
มก./ล.	หมายถึง	มิลลิกรัมต่อลิตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยมีการเจริญเติบโตและการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมยาง และอุตสาหกรรมหุบลโหะ เป็นต้น อุตสาหกรรมดังกล่าวล้วนมีน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมหุบลโหะมักพบปัญหาน้ำเสียมีการปนเปื้อน โลหะหนัก โลหะหนักที่ปนเปื้อน เช่น นิกเกิลและ โครเมียม เป็นต้น (Saleh, Gupta, and Al-Saadi, 2013; Bansal et al., 2005) เนื่องด้วยอุตสาหกรรมหุบลโหะส่วนใหญ่ใช้โลหะหนักทั้งสองชนิดในการหุบลโหะ (Durney, 1984) ซึ่งพบว่านิกเกิลและโครเมียมมีความเป็นพิษสูงสามารถส่งผลกระทบต่อทั้งในมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (Arup and SenGupta, 2002) ผลกระทบที่พบในมนุษย์คือก่อให้เกิดมะเร็ง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือแหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Saleh et al., 2013; York, Salomons, Forstner, and Mader, 1995) จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดหรือกำจัด โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและลดการสะสมในสิ่งแวดล้อม

การกำจัดหรือบำบัด โลหะหนักในน้ำเสียมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Precipitation) การดูดซับ (Adsorption) การกรองด้วยเยื่อกรอง (Membrane filtration) การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical treatment) การสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการออกซิเดชันหรือการกรอง (Oxidation/filtration) เป็นต้น (Barakat, 2011) ทั้งนี้วิธีการดูดซับเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด โลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องจากค่าใช้จ่ายน้อย ง่ายต่อการควบคุม สามารถบำบัดได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จำพวก โลหะหนัก (Arup and SenGupta, 2002) วิธีการดูดซับสามารถกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพร้อยละ 98 ด้วยการใช้ระบบคอลัมน์ (Gupta, Ganjali, Nayak, Bhushan, and Agarwal, 2012) สิ่งสำคัญในการดูดซับคือ ตัวดูดซับ พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับ โลหะหนักได้ (Arup and SenGupta, 2002; Bansal and Goyal, 2005) จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยส่วน

ใหญ่ทำจากวัสดุทางธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ขึ้น วัสดุทางธรรมชาติที่นิยมใช้ เช่น เปลือกผลไม้ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด และไม้ เป็นต้น (Barakat, 2011; Gupta, Ali, Saleh, Siddqui, and Agarwal, 2013) นอกจากนี้พบมีการนำยางรถยนต์มาเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านกัมมันต์ เพื่อลดปัญหาการฝังกลบและลดปริมาณขยะจากยางรถยนต์ ซึ่งต้องผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เรียกว่า “คาร์บอนแบล็ค” มาทำเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากคาร์บอนแบล็คมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (Williams, 2013) สอดคล้องกับคุณสมบัติของวัตถุดิบที่จะนำมาทำถ่านกัมมันต์ (Gupta et al., 2012)

ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญในการนำคาร์บอนแบล็คจากยางรถยนต์มาทำถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพเพื่อใช้ดูดซับนิกเกิลและโครเมียมโดยใช้ระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ นอกจากนี้ได้ศึกษาการนำโลหะหนักกลับคืน (Recovery) จากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักแล้ว ด้วยการสกัดโดยใช้กรดหรือด่าง (Kubonova, Langova, Nowak, and Winter, 2013; Singh and Lee, 2016) และนำถ่านกัมมันต์ดังกล่าวกลับมาใช้ดูดซับโลหะหนักอีกครั้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนและนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำในระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การทำวิจัยเรื่องการดูดซับและการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนจากน้ำเสียชุบโลหะด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ อยู่ภายใต้ขอบเขตการศึกษาวิจัย ดังนี้

1.3.1 คาร์บอนแบล็คเป็นวัตถุดิบที่นำมาทำถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ โดยทำการกระตุ้นทางกายภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์

1.3.2 การศึกษาสภาวะในการดูดซับที่เหมาะสม ทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมี นิกเกิลและโครเมียมผสมอยู่ร่วมกัน

1.3.3 การศึกษาการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ ใช้น้ำเสียชุบ โลหะจากอุตสาหกรรม

1.3.4 โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียชุบโลหะถูกวิเคราะห์ในรูปของโครเมียมรวม

1.3.5 ระบบที่ใช้ในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสีย คือระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ โดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง 7 วัน

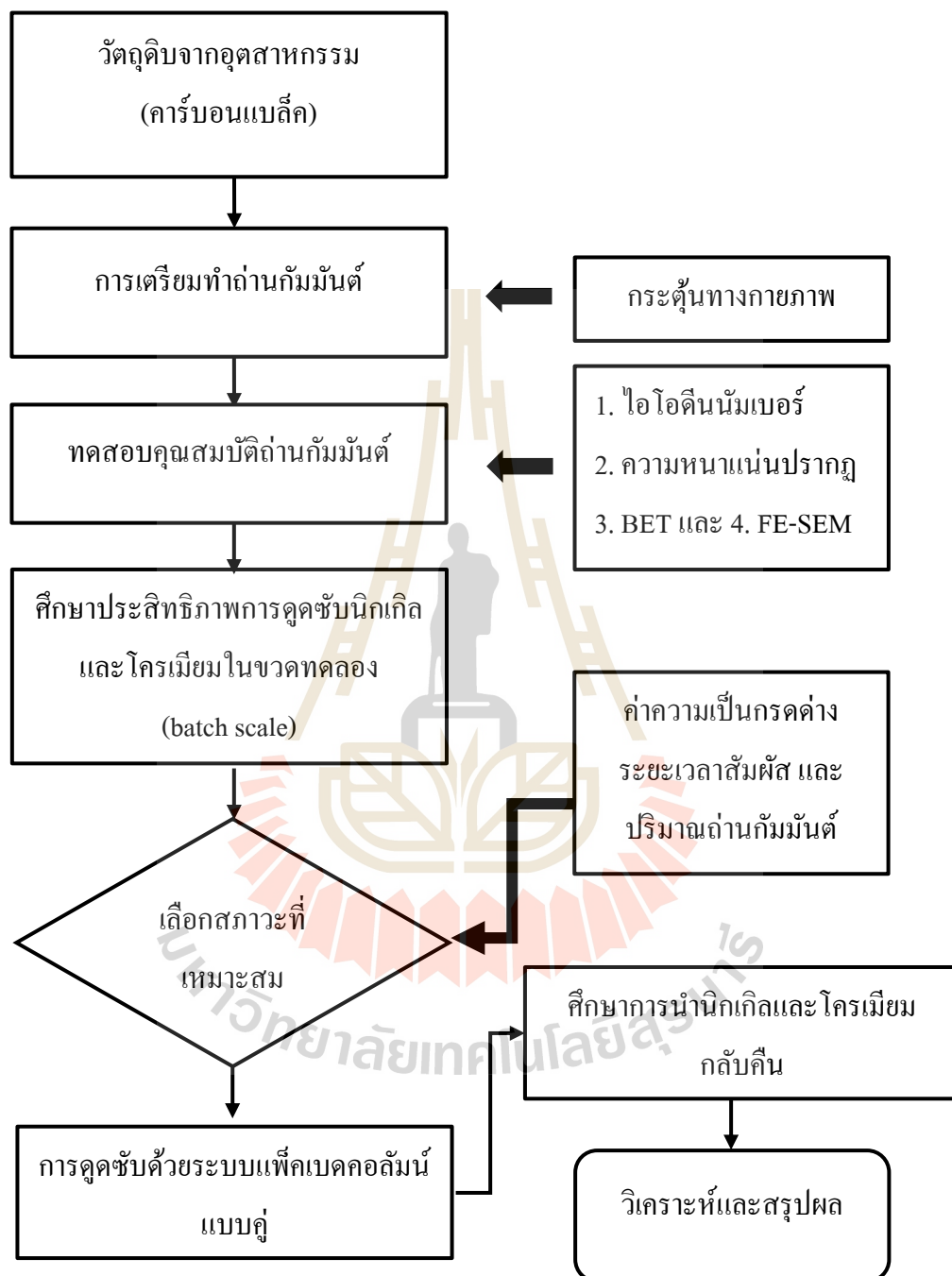
1.3.6 ศึกษาสารสกัดที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืน ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ขยายรถยนต์สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบทางเลือกในการทำถ่านกัมมันต์

1.4.2 ถ่านกัมมันต์จากขยารถยนต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุบโลหะได้

1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย (Conceptual Framework)



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมหุบโลหะ

ปัจจุบันพบว่าอุตสาหกรรมหุบโลหะมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเสียมากขึ้น และน้ำเสียที่เกิดขึ้นพบมีการปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล เป็นต้น ซึ่งมีความเป็นพิษสูงมีผลกระทบต่อสุขภาพร่างกาย ก่อให้เกิดมะเร็ง มีผลต่อระบบประสาท และทำลายสิ่งแวดล้อม แหล่งน้ำได้รับการปนเปื้อน ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และดิน (Saleh et al., 2013; Zhang, Li, Zhou, Chen and Qian, 2012) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของอุตสาหกรรมหุบโลหะ มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานให้มีความเหมาะสม และมีความสะอาด ก่อนนำไปสู่ขั้นตอนการชุบด้วยโลหะ ขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

2.1.1.1 ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงาน เป็นขั้นตอนที่ทำให้ชิ้นงานเรียบ เพื่อความสามารถในการชุบติดโลหะหนัก ในขั้นตอนนี้อุปกรณ์ที่ใช้คือ จานขัดหมุนด้วยไฟฟ้า หรือมอเตอร์ขัด ล้อขัด สายพานขัด และกระดาษทราย

2.1.1.2 ขั้นตอนการล้างไขมันด้วยด่าง เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานมีสองวิธีคือการจุ่มและสเปรย์ ใช้ด่างในการทำทำความสะอาด เช่น โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต แอนไอออนิกเซอร์แฟกแตนท์ และนอนไอออนิกเซอร์แฟกแตนท์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-15 นาที ยกเว้นการใช้สเปรย์ด้วยเซอร์แฟกแตนท์ จะใช้อุณหภูมิ 64-74 องศาเซลเซียส

2.1.1.3 ขั้นตอนการกำจัดสนิมด้วยกรด เป็นขั้นตอนการกำจัดสนิมและฟิล์มออกไซด์ออกจากผิวของชิ้นงาน ส่วนใหญ่ใช้กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5-15 %

2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ

ขั้นตอนการชุบโลหะนี้ใช้โลหะชุบด้วยไฟฟ้า ซึ่งโลหะที่ใช้ เช่น นิกเกิล โครเมียม และ ทองแดง เป็นต้น ในบ่อชุบนั้นประกอบด้วยมีขั้วไฟฟ้าสองขั้วคือ ขั้วแคโทด และขั้วแอโนด

2.1.2.1 ขั้นตอนการชุบด้วยนิกเกิล ซึ่งมีการชุบหลายประเภทด้วยกันประกอบด้วย นิกเกิล เงาน นิกเกิลด้าน นิกเกิลกึ่งเงา ซาตินนิกเกิล และนิกเกิลดำ ใช้ระยะเวลา 20 นาที ถึง 1 ชั่วโมง ตามมาตรฐานใช้อุณหภูมิที่ 45-65 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 3.5-4.5 สารเคมีที่ใช้คือโลหะ นิกเกิล สารละลายนิกเกิลคลอไรด์เข้มข้น 40-60 กรัมต่อลิตร สารละลายนิกเกิลซัลเฟตเข้มข้น ประมาณ 250-300 กรัมต่อลิตร สารละลายกรดบอริกเข้มข้น 35-45 กรัมต่อลิตร น้ำยาฟีน น้ำยาเงา และน้ำกลั่น โดยขั้นตอนนี้มีการใช้ไฟฟ้า (ภาพที่ 2.1)

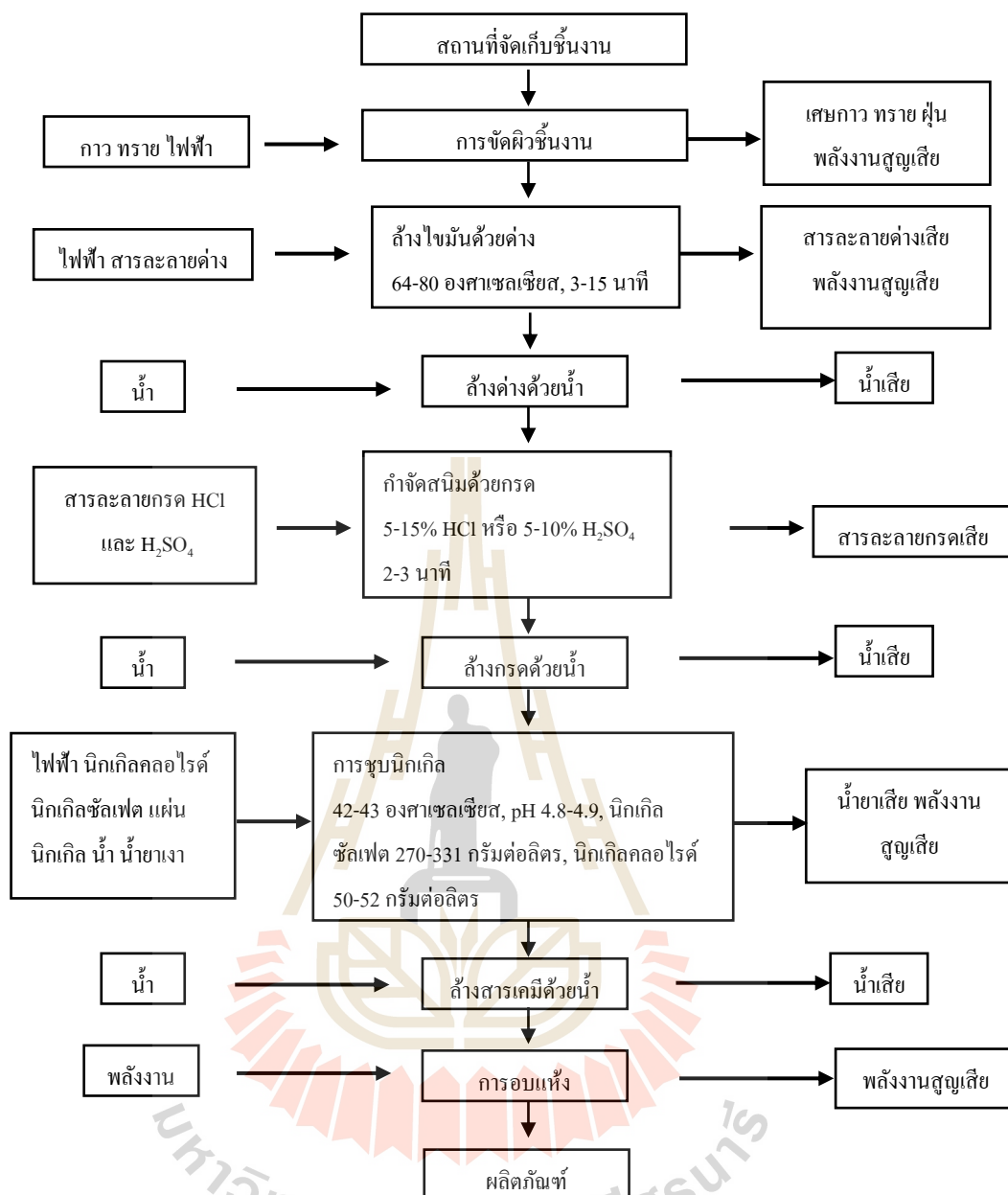
2.1.2.2 ขั้นตอนการชุบโครเมียม เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาในการชุบน้อยที่สุดคือ 10-20 วินาที ตามมาตรฐานใช้อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้คือ สารละลายกรดโครมิกเข้มข้น 126-250 กรัมต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟูริก 2.5 กรัมต่อลิตร ขั้นตอนการชุบนี้พบมีความเข้มข้นของโครเมียมเสกชาวาเลนที่ไอออน อยู่ในช่วง 126-190 กรัมต่อลิตร

2.1.2.3 ขั้นตอนการชุบฮาร์โครม คล้ายกับการชุบโครเมียมแต่มีชั้นโครเมียมหนาตั้งแต่ 25 ไมโครเมตร ไปถึง 0.025 มิลลิเมตร ขึ้นไป ผิวของชิ้นงานมีความหนาทำให้มีความแข็งแรง ทนต่อ อุณหภูมิ ทนการเสียดสี ทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความฝืดต่ำ ตามมาตรฐานอุณหภูมิการชุบอยู่ที่ 50-52 องศาเซลเซียส กรดโครมิกที่ใช้เข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร

2.1.2.4 ขั้นตอนการชุบทองแดง เป็นขั้นตอนเคลือบผิวชั้นแรกที่ผ่านการชุบโลหะรอบแรก แล้ว สามารถแบ่งได้ตามสภาพน้ำยาชุบดังนี้

2.1.2.4.1 การชุบทองแดงแบบต่าง อุณหภูมิที่ใช้คือ 41-60 องศาเซลเซียส สารเคมี ที่ใช้คือคอปเปอร์ไซยาไนด์เข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร โซเดียมไซยาไนด์เข้มข้น 23 กรัมต่อลิตร หรือ โพแทสเซียมไซยาไนด์ โซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร

2.1.2.4.2 การชุบทองแดงแบบกรด อุณหภูมิการชุบ 25 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ ใช้ คอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 188 กรัมต่อลิตร กรดซัลฟูริกเข้มข้น 75 กรัมต่อลิตร และน้ำยาเงา



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตของอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยการชูนิกเกิล

2.1.3 ขั้นตอนการล้าง

เป็นขั้นตอนการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้ปริมาณน้ำมากที่สุด ขั้นตอนการล้างมีสองแบบคือ การจุ่มล้างและการตัดกรด ซึ่งขั้นตอนการล้างนี้จะล้างก่อนและหลังการชุบ มีขั้นตอนดังนี้

2.1.3.1 การล้างหลังการขัดผิวชิ้นงาน

2.1.3.2 การล้างหลังจากการล้างไขมันด้วยด่าง

2.1.3.3 การล้างหลังจากการกำจัดสนิมด้วยกรด

2.1.3.4 การล้างหลังจากการชุบนิกเกิล

2.1.3.5 การล้างหลังจากการชุบโครเมียม

2.1.4 ขั้นตอนการอบแห้ง

ขั้นตอนการอบแห้ง ใช้วิธีการอบในเตาอบ ซึ่งเตาอบมีหลายวิธีด้วยกันคือ แบบใช้ลมร้อน โดยการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง แบบใช้ความร้อนโดยการใช้พลังงานไฟฟ้า หากเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กก็อาจใช้วิธีการผึ่งแดด ซึ่งขั้นตอนนี้ใช้ระยะเวลาในการอบนาน ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมชุบโลหะ พบมีน้ำเสียเกิดขึ้นปริมาณมากเกือบทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีการปนเปื้อนทั้งโลหะหนักและสารเคมี ซึ่งมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขั้นตอนและกระบวนการผลิต

2.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะพบปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณสูง จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากกระบวนการล้างซึ่งใช้น้ำล้างปริมาณมาก โดยพบความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียชุบโลหะ ส่วนใหญ่พบนิกเกิล โครเมียม และคอปเปอร์ (ตารางที่ 2.1) หากเป็นน้ำเสียที่มีความเป็นกรดต่าง พบความเข้มข้นของโครเมียม และนิกเกิลมากที่สุด (Lee, Song, Ryu, Park, Choi, and Lee, 2016) ซึ่งอุตสาหกรรมชุบโลหะพบมีการใช้นิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) และนิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) ในการชุบโลหะ (ตารางที่ 2.1) โดยนิกเกิลที่พบในน้ำเสียมียหลายรูปแบบประกอบด้วย Ni^{2+} , $\text{Ni}(\text{OH})^+$, $\text{Ni}(\text{OH})_4^{2-}$, $\text{Ni}(\text{OH})_3^-$ และ $\text{Ni}(\text{OH})_{2(s)}$ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Bansal et al., 2005; Gonsalvesh, Marinov, Gryglewicz, Carleer, and Yperman, 2016) ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียนั้น หากน้ำเสียมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 2-8 จะพบนิกเกิลอยู่ในรูปของ Ni^{2+} (Gonsalvesh et al., 2016) และพบมีการใช้โครเมียมซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีการปนเปื้อนของโครเมียมในหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าถ้าน้ำเสียมีค่าความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 3.6 โครเมียมจะอยู่ในรูป Cr^{3+} หากมีค่าความเป็นกรดต่างมากกว่า 4 แต่ น้อยกว่า 6.5 โครเมียมจะอยู่ในรูป $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Guertin, Jacobs, and Avakian, 2005; Rich, 2007; Gupta et al., 2013)

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ

น้ำเสีย	pH	Cr มก./ล.	Cu มก./ล.	Ni มก./ล.	Cd มก./ล.	Zn มก./ล.	CN มก./ล.	อ้างอิง
น้ำเสียชุบโลหะมี ความเป็นกรดต่าง	2.19	93.25	36.16	50.94	N.D.	N.D.	4.64	(Lee et al., 2016)
น้ำเสียชุบโลหะที่มี ไซยาไนด์	4.01	12.42	2.06	22.34	N.D.	196.72	N.D.	
น้ำเสียชุบโลหะ	5.60	0.19	12.94	5.82	0.03	N.D.	N.D.	(Husain et al., 2014)
น้ำเสียชุบโลหะ	7-10	0.5	0.5	0.5	0.1	2	N.D.	(Babu et al., 2009)

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ตรวจวิเคราะห์ไม่พบ

ตารางที่ 2.2 การใช้ทรัพยากรในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมชุบโลหะ (กรมโรงงาน
อุตสาหกรรม, 2548)

กระบวนการ ชุบโลหะ	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	โลหะนิกเกิล (กก.)	นิกเกิลคลอ ไรด์(กก.)	นิกเกิลซัลเฟต (กก.)	โครเมียม (กก.)	ทองแดง (กก.)
กลุ่มชุบโลหะนิกเกิล	0.31-1.50	1.16-1.74	0.20-0.53	0.60-4.62	N.D.	N.D.
กลุ่มชุบโลหะนิกเกิลและ โครเมียม	0.33-1.50	1.06-2.84	0.33-8.62	0.30-7.21	0.93-2.09	N.D.
กลุ่มชุบโลหะทองแดง นิกเกิลและโครเมียม	1.08	1.07	0.18	0.17	2.06	1.03

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ตรวจวิเคราะห์ไม่พบ

2.3 โลหะหนัก

โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะมีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งล้วนแต่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงมีการกำหนดค่ามาตรฐานระดับการปนเปื้อนสูงสุด (Maximum contaminant level) (ตารางที่ 2.3) ซึ่งโลหะหนักบางชนิดมีประโยชน์หากได้รับในปริมาณที่เหมาะสม และบางชนิดเป็นพิษเมื่อได้รับในปริมาณสูง โดยความเป็นพิษนั้นมีความแตกต่างกันดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้

2.3.1 นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลเป็นโลหะหนักที่ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ไฟฟ้า อุตสาหกรรม-ชุบโลหะแบบไฟฟ้าในการตกแต่งชิ้นงาน และส่วนผสมของเหรียญ นอกจากนี้ยังพบการใช้นิกเกิลในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ สีย้อม และการเผาไหม้เชื้อเพลิง นิกเกิลมีผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์ ก่อให้เกิดโรคทางผิวหนัง โรคระบบทางเดินอาหาร โรคมะเร็งปอด โรคหลอดเลือด โรคความดันโลหิตสูง มีผลต่อระบบประสาท พัฒนาการของเด็ก หลดลมอวัยวะเรื้อรัง และ ก่อให้เกิดอาการวิงเวียน ไอ ผลกระทบที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือ แหล่งน้ำปนเปื้อน โลหะหนัก (Bhatnagar and Minocha, 2010; Ma, Gao, Sun, and Huang, 2015) น้ำเสียจาก อุตสาหกรรมชุบโลหะพบปนเปื้อนนิกเกิลร้อยละ 50.94 มิลลิกรัมต่อลิตร (Lee et al., 2016) อุตสาหกรรมชุบโลหะใช้นิกเกิลในการเคลือบตกแต่งเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของผิวชิ้นงาน นิกเกิล มีซัลไฟด์และออกไซด์เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก ธาตุซัลไฟด์ของนิกเกิลส่วนใหญ่ถูกดึงมาจากแร่ ธาตุได้ดินกับการนำกลับคืนจากวิธี hard rock mining method และการเปิดหน้าดินของการทำเหมือง แร่ ยังพบว่ามีการใช้นิกเกิลในการทำ stainless steel ร้อยละ 62.7, Nickel-base alloys ร้อยละ 11.9, ชุบโลหะร้อยละ 9.7, alloy steels ร้อยละ 9.0, foundry products ร้อยละ 3.5, copper-base alloys ร้อย ละ 1.4 และอื่นๆ ร้อยละ 1.8 ซึ่งนิกเกิลมีค่าความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electronegativity: EN) เท่ากับ 1.8 (เกษม พลายแก้ว, 2553)

2.3.2 โครเมียม (Chromium)

โครเมียมมีความเป็นพิษสูงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ พบได้ใน อุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมตกแต่ง ด้วยโลหะ การรักษาสภาพไม้ กระบวนการผลิตทางเคมี ซีเมนต์ และสีย้อม เป็นต้น โครเมียมที่ถูกใช้ ในอุตสาหกรรมชุบโลหะนั้นพบมีน้ำเสียปนเปื้อนโครเมียมร้อยละ 93.25 มิลลิกรัมต่อลิตร (Lee et al., 2016) โครเมียมที่อยู่ตามธรรมชาติมีสองรูปแบบคือ ไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+3}) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+6}) ซึ่ง เฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีความเป็นพิษสูงกว่า ไตรวาเลนต์โครเมียม และ ไตรวาเลนต์โครเมียมสามารถออกซิไดซ์เป็นเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้ด้วยสารประกอบอินทรีย์ ผลกระทบจากโครเมียมคือก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ก่อให้เกิดอาการท้องร่วง มีผลกระทบต่อกระเพาะ บัสดาวะ ปอด และตับ (Li, Shen, Huang, Li, and Ye, 2014) รวมทั้งโครเมียมสามารถปนเปื้อนและ สะสมในสิ่งแวดล้อมได้ โครเมียมมีประ โยชน์ต่อมนุษย์ในปริมาณที่เหมาะสมแต่จะเป็นอันตรายเมื่อ มีความเข้มข้นสูง และโครเมียมมีค่าความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electronegativity: EN) เท่ากับ 1.6 (เกษม พลายแก้ว, 2553)

2.3.3 แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ โดยมนุษย์ได้รับสัมผัสแคดเมียมจากการสูบบุหรี่ ผุ่น อาหาร และน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งแคดเมียมสามารถสะสมในร่างกาย เป็นพิษต่อไต เนื้อเยื่อกระดูกของผู้ใหญ่ มีผลต่อการพัฒนาระบบประสาท และการพัฒนาสมองของทารกในครรภ์ (Wang, Chen, Gao, Zhang, Wang, Zhou, Hu, Shi, and Tian, 2016) แคดเมียมทำให้เกิดอาการท้องเสีย คลื่นไส้ ตะคริวกล้ามเนื้อ และไขกระดูกเสียหาย อาจก่อให้เกิดมะเร็งและนิวไนไต (Lee, Laldawngliana, and Tiwari, 2012) แคดเมียมมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับสังกะสี (Tiberg and Gustafsson, 2016) เกี่ยวข้องกับระบบการต้านอนุมูลอิสระ และการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีน พบเกิดจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และกิจกรรมทางการเกษตร แคดเมียมสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหาร

2.3.4 ทองแดง (Copper)

เป็นธาตุอาหารของพืช การรับสัมผัสทองแดงโดยตรงเป็นไปได้ยากแต่จะได้รับสัมผัสจากการบริโภคอาหารหรือน้ำที่มีทองแดงปนเปื้อนในปริมาณสูง (Gray and Eppinger, 2012) ทองแดงเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตและมนุษย์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน และการดูดซับไอออน การบริโภคทองแดงมากเกินไปทำให้มีผลต่อกระเพาะอาหาร ลำไส้ ตับ ไต และก่อให้เกิดโรคโลหิตจาง (Lee et al., 2012) ทองแดงเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นอันตรายสูงหากร่างกายได้รับจะถูกสะสมในตับ ทองแดงจะเป็นพิษเมื่อสัมผัสในปริมาณความเข้มข้นสูง และยังพบมีการนำทองแดงมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ ปีโตรเลียม เหมืองแร่ เป็นต้น อย่างไรก็ตามทองแดงสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในดิน (Singha and Das, 2013)

2.3.5 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วมีความเป็นพิษสูง มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางดิน น้ำ อากาศ และมนุษย์มีผลกระทบต่อไต ระบบประสาท และระบบภูมิคุ้มกัน ตะกั่วนิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมเซรามิก สี พลาสติก และสายเคเบิลไฟฟ้าที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นจึงพบการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณสูง (Abbaszadeh, Alwi, Webb, Ghasemi, and Muhamad, 2016)

2.3.6 สังกะสี (Zinc)

สังกะสีก่อให้เกิดผลกระทบต่อกระเพาะอาหารทำให้เกิดอาการอาเจียน วิงเวียน โลหิตจาง เกิดโรคทางผิวหนัง และยังพบว่า มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน ก่อให้เกิดอาการท้องร่วง ผม่วง สังกะสียังมีประโยชน์ในเรื่องของการช่วยป้องกันการสึกกร่อนของ

เหล็ก และสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นของสิ่งมีชีวิต เช่น เป็นส่วนประกอบของโปรตีน พบมีการใช้สังกะสีในอุตสาหกรรมชุบโลหะ การผลิตทองเหลืองทองแดง และพบเป็นส่วนผสมในสารเคมีและนอกจากนี้ยังพบมีการใช้สังกะสีในโลหะผสม ถนน และทางการเกษตร ปัจจุบันพบปัญหาแหล่งน้ำปนเปื้อนสังกะสีจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การถลุงแร่ และอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในอากาศ น้ำใต้ดิน และตะกอนในแม่น้ำได้ (Malhotra, and Dawan, 2014; Hosseini, Bringas, Tan, Ortiz, Ghahramani, and Shahmirzadi, 2016)

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการปนเปื้อนสูงสุด (Maximum contaminant level: MCL) สำหรับความเป็นอันตรายของโลหะหนัก (Barakat, 2011)

โลหะหนัก	ความเป็นพิษ	MCL (มก./ล.)
As	อาการทางผิวหนัง มะเร็ง และโรคหลอดเลือด	0.050
Cd	โรคไต และก่อมะเร็ง	0.01
Cr	ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสียและมะเร็ง	0.05
Cu	ตับเสียหาย โรคนอนไม่หลับและโรคจิตสัน	0.25
Ni	ผิวหนังอักเสบ คลื่นไส้ โรคหอบหืดเรื้อรัง ไอ และสารก่อมะเร็ง	0.20
Zn	อาการซึมเศร้า อาการทางระบบประสาท และกระหายน้ำ	0.80
Pb	สมองของทารกในครรภ์เสียหาย โรคไต ระบบไหลเวียนเลือด และระบบประสาท	0.006
Mg	โรคไขข้ออักเสบ โรคไต ระบบไหลเวียนเลือด และระบบประสาท	0.00003

2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนัก

น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมชุบโลหะจะมีค่าตามมาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องผ่านการบำบัดหรือกำจัดที่เหมาะสม ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมต่อการบำบัดหรือกำจัดน้ำเสีย และมีข้อดีข้อเสียต่างกัน (ตารางที่ 2.4) จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม วิธีดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation)

การสร้างตะกอนและรวมตะกอนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ เป็นกระบวนการทางกายภาพ เช่น การผสมให้เข้ากันแล้วทำให้เกิดการสร้างตะกอนหรือรวมตะกอน บางครั้งอาจใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอนและรวมตะกอน ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการคือ ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ และปริมาณโลหะหนักหรือชนิดของโลหะหนัก วิธีการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้

สามารถดำเนินการในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่กว้าง (Fu and Wang, 2011; Patil, Chavana, and Oubagaranadin, 2016)

2.4.2 การใช้สารเคมีในการตกตะกอน (Precipitation)

การใช้สารเคมีในการตกตะกอนเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เพราะกระบวนการง่าย โดยกระบวนการจะเกิดตะกอนแยกจากน้ำ เช่น การเกิดตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้สารเคมีทำให้เกิดการตกตะกอน ในปฏิกิริยาการเกิดตะกอนมีค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 9.4 สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับค่าความเป็นกรดต่างคือ ไฮดรอกไซด์ และ ซัลไฟด์ (Fu et al., 2011; Patil et al., 2016)

2.4.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ นิยมใช้บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนของโลหะหนักซึ่งเป็นไอออนบวก กับตัวแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งเป็นไอออนลบ เช่น เรซิน อาจสังเคราะห์ขึ้น หรือสังเคราะห์จากธรรมชาติโดยมีธาตุซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ตัวแปรที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก และเวลาในการสัมผัส (Fu et al., 2011; Patil et al., 2016)

2.4.4 การกรองผ่านเยื่อกรอง (Membrane filtration)

การกรองผ่านเยื่อกรองนิยมใช้ในการทำให้น้ำคุณภาพดีขึ้น การกรองผ่านเยื่อกรองสารละลายจะซึมผ่านเยื่อกรองและเกิดการกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในน้ำ ซึ่งเยื่อกรองจะมีรูเพื่อให้สารละลายผ่านได้ขนาดของรูขึ้นอยู่กับความต้องการในการดำเนินการ และประสิทธิภาพที่ต้องการ วิธีนี้มีหลายชนิดด้วยกัน คือ Microfiltration, Ultrafiltration, Nano-filtration, Reverse osmosis และ Electrodialysis (Fu et al., 2011) การกรองผ่านเยื่อกรองสามารถบำบัดสารอนินทรีย์ในน้ำทิ้ง และสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย สารประกอบอินทรีย์ และสารพวกโลหะหนักในน้ำเสียได้ เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการดำเนินการ (Barakat, 2011; Fu et al., 2011)

2.4.5 การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical treatment)

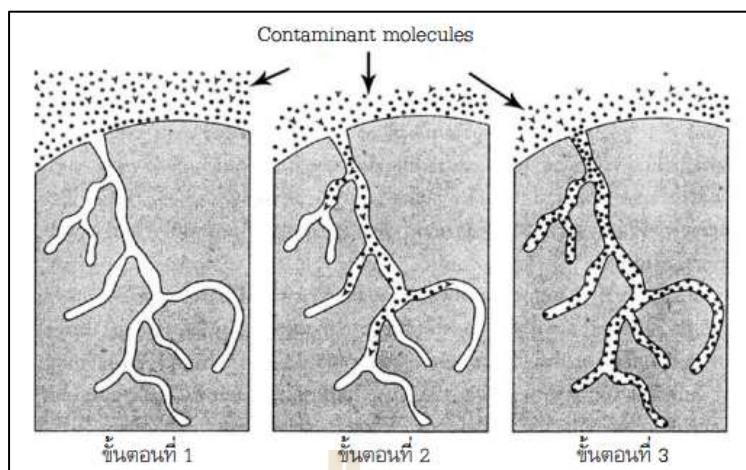
การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี เกี่ยวข้องกับแผ่นไฟฟ้าเคมีที่มีขั้วบวกและขั้วลบ เป็นการสร้างตะกอนในสารละลายหรือน้ำเสียโดยน้ำเสียที่มีโลหะหนักเป็นขั้วบวกจะเคลื่อนที่ไปอยู่ฝั่งขั้วลบของแผ่นไฟฟ้าเคมีทำให้เกิดการรวมตะกอนขึ้น เรียกว่า Electrocoagulation กระบวนการแยกของแข็ง

หรือของเหลวที่ลอยบนผิวน้ำหรือเป็นฟองบนผิวน้ำออกจากผิวน้ำ เรียกว่า Electro-flocculation (Fu et al., 2011)

2.4.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือ การสะสมสารหรือมลพิษไว้ที่พื้นผิวตัวดูดซับเกิดการจับกันของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า “Adsorbate” และตัวดูดซับเรียกว่า “Adsorbent” (Bansal et al., 2005) กระบวนการดูดซับใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง และกำจัดสารเคมีที่เป็นพิษ เช่น สารกำจัดศัตรูพืช และฟีนอล เป็นต้น (Patil et al., 2016) กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพและเคมี เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนจากของเหลวสู่ของแข็ง นิยมใช้วิธีการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย เพราะค่าใช้จ่ายต่ำ และง่ายต่อการดำเนินการ อีกทั้งตัวดูดซับสามารถผลิตจากของเสียจากการเกษตร ของเสียจากอุตสาหกรรม และผลิตจากวัสดุชีวภาพจากธรรมชาติ (Barakat, 2011) การดูดซับนั้นพบว่าการแข่งขันการดูดซับกันเอง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปฏิสัมพันธ์ของพื้นผิวกับสารมลพิษ คือความแข็งแรงในการดูดซับกันขึ้นอยู่กับขั้วของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ถ้ามีขั้วความสามารถในการดูดซับจะแข็งแรงมากกว่าที่ไม่มีขั้ว การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลโมเลกุลของสารมลพิษเพิ่มขึ้น และขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของสารมลพิษ (Bansal et al., 2005) สำหรับกลไกการดูดซับเป็นการกักสารที่อยู่ในสารละลาย เช่น สารแขวนลอยจะถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับภายในรูพรุน กระบวนการดูดซับมี 2 ชนิด คือการดูดซับทางกายภาพโดยยึดเหนี่ยวด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ และการดูดซับทางเคมีโดยแรงยึดเหนี่ยวจากพันธะเคมีระหว่างโมเลกุล (Marsh and Rodriguez-Reinoso, 2006; Cecen and Aktas, 2012) โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้ (ภาพที่ 2.2)

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายไปยังพื้นผิวถ่านกัมมันต์การเคลื่อนที่นี้จะเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่
2. การแพร่ผ่านฟิล์มบางของถ่านกัมมันต์ตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านฟิล์มบางโดยวิธีการแพร่ของโมเลกุลทั้งระยะทางและการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล
3. เกิดการแพร่ของโมเลกุลผ่านช่องว่างในการดูดซับโดยสารละลายเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ
4. ขั้นตอนการดูดซับ เกิดการสร้างพันธะระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ



ภาพที่ 2.2 กลไกการดูดซับ (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

2.4.6.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับประกอบด้วยหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยมีรายละเอียดดังนี้ (Cecen and Aktas, 2012; Arup and SenGupta, 2002; Bansal et al., 2005)

1. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ คือสัดส่วนของพื้นที่ผิวซึ่งใช้ในการดูดซับ รูปทรงขนาดเล็กของตัวดูดซับส่งผลต่อการดูดซับมากขึ้น

2. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวถูกดูดซับ คือถ้าตัวถูกดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่จะสามารถถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดเล็ก และขั้วของตัวถูกดูดซับก็เป็นสิ่งสำคัญ

ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับ โมเลกุลที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าโมเลกุลที่มีขั้ว หากตัวถูกดูดซับเป็นโลหะหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก

3. ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) โมเลกุลที่มีไอออนลบ แสดงว่ามีค่า pH สูง โมเลกุลที่มีไอออนบวก แสดงว่ามีค่า pH ต่ำ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับค่า pH ของตัวดูดซับหรือตัวถูกดูดซับ หากสารละลายมีค่า pH ต่ำ แสดงว่ามีปริมาณไอออนบวกเพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันระหว่างไอออนบวกของโลหะหนักกับไอออนของสารละลาย ในการจับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Langmuir, 1997)

4. อุณหภูมิ คือการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง เพราะว่าปฏิกิริยาการดูดซับคือการคายความร้อน (Exothermic)

5. รูพรุนของตัวดูดซับ คือการดูดซับขึ้นกับรูปร่างและขนาดของรูพรุน โดยจะแบ่งเป็น ไมโครพอร์ (Micropores), มีโซพอร์ (Mesopores) และ แม็กโครพอร์ (Macropore)

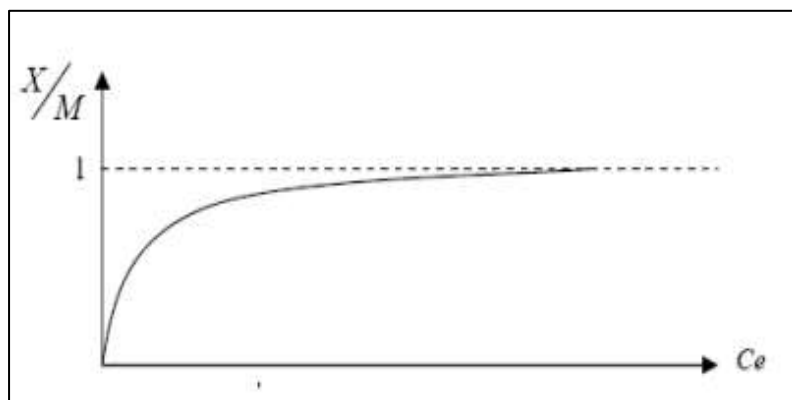
6. ลักษณะพื้นผิวทางเคมี คือการดูดซับขึ้นกับลักษณะพื้นผิวทางเคมีของตัวดูดซับ

2.4.6.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Isotherm adsorption)

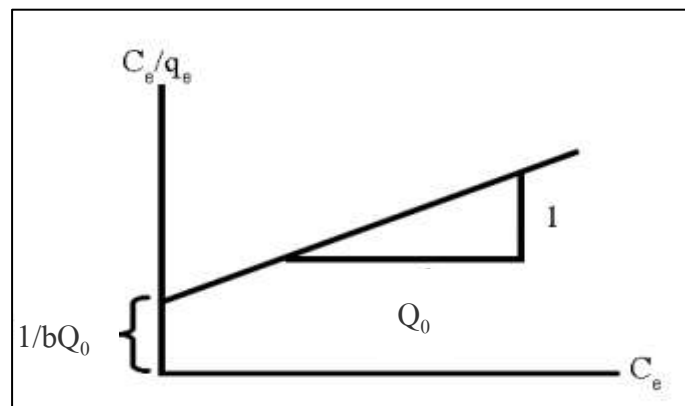
ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นการอธิบายการดูดซับและการเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะหนักที่ไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับที่สถานะสมดุล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบการดูดซับ ประกอบด้วยทฤษฎีโมเดล 2 โมเดลที่นิยมใช้ในการศึกษาคือ Langmuir และ Freundlich model (Gupta et al., 2013; Mousavi, Housseynifar, Jahed, and Dehghani, 2010)

2.4.6.2.1. แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm)

แลงเมียร์ไอโซเทอร์มคือการบ่งบอกถึงการดูดซับบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Gupta et al., 2013) มีสมมติฐานคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งที่แน่นอน โดยแต่ละโมเลกุลของสารมลพิษจะถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้เพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น (Monolayer) ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน ข้อดีของสมการแลงเมียร์คือเป็นสมการพื้นฐานสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงกว้าง และสามารถทราบการดูดซับสูงสุด (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005; Langmuir, 1997) โดยค่าที่ได้จากการคำนวณดังแสดงสมการที่ 1, 2 หรือ 3 เป็นค่าที่ถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักกับปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม (ภาพที่ 2.3) เพื่อแสดงให้เห็นจุดสมดุลของการดูดซับ และการแสดงกราฟเส้นตรงของแลงเมียร์ (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง X/M และ C_e



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/Q กับ C_e

$$q_e = \frac{X}{m} = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Q_0 b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad \text{หรือ} \quad \frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0 b} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_0} \quad (2, 3)$$

C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)

Q คือ จำนวนไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มก./ก.)

b คือ ค่าคงที่ของพลังงานการดูดซับ (ล./มก.)

Q_0 คือ ปริมาณสูงสุดของโลหะหนักต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (มก./ก.)

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม (มก./ก.)

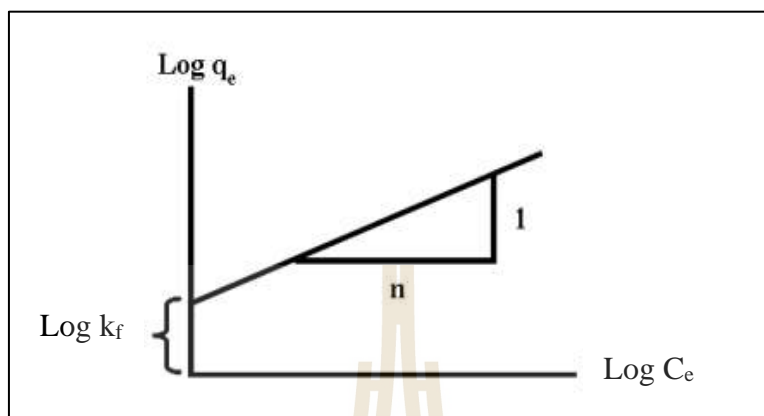
X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับ (มก.)

m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (ก.)

2.4.6.2 ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม (Freundlich isotherm)

ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม คือใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าไว้ด้วยกัน เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005; Langmuir, 1997) ข้อเสียคือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี โดยสร้างกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลกับค่าล็อกของปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

หนัก 1 กรัม จากการคำนวณตามสมการของฟรุนดลิช ดังสมการที่ 4, 5 และ 6 (ภาพที่ 2.5) ข้อจำกัดคือไม่สามารถทราบการดูดซับสูงสุดได้ (Langmuir, 1997)



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$

$$q_e = \frac{X}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$Q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (5)$$

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

K_f คือ ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ล./ก.)

n คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงการดูดซับ (ได้จากกราฟ)

Q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล (มก./ก.)

C_e คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล (มก./ล.)

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม

X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับ (มก.)

m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (มก.)

2.4.6.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับคือ การดูดซับสารเข้าไปแทนที่ในตัวดูดซับเพราะมีแรงดึงดูดระหว่างสารมลพิษกับตัวดูดซับ กลไกการดูดซับมี 2 แบบ คือการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้งสองชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในชั้นของเหลว

เข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นแรงดึงดูดบนผิวของของแข็งเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลว มีรายละเอียดดังนี้ (Marsh et al., 2006; Cecen et al., 2012)

2.4.6.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ง่ายเนื่องจากเป็นแรงที่อ่อนมากมีความแข็งแรงน้อย ซึ่งเกิดจากแรงกระจายและแรงไฟฟ้าสถิตเนื่องด้วยเป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่ดึงดูดโมเลกุลเข้าด้วยกันแต่ไม่สร้างพันธะต่อกัน (เกษม พลายแก้ว, 2553; Marsh et al., 2006; Cecen and Aktas, 2012) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดติดกับโมเลกุลของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Cecen et al., 2012) คือแต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดบนโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้า จำนวนชั้นของการดูดซับจะขึ้นกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ปัจจัยสำคัญในการดูดซับทางกายภาพคือ การจัดเรียงตัว การกระจายตัวของโมเลกุลและการเหนี่ยวนำ

2.4.6.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ยากเนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นเป็นพันธะที่แข็งแรง จับพันธะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันซึ่งเป็นพันธะเดี่ยวเท่านั้น การดูดซับจึงเป็นแบบชั้นเดียว (เกษม พลายแก้ว; Marsh et al., 2006; Cecen and Aktas, 2012) การเกิดสนามแม่เหล็กซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและพันธะเคมีจากการรวมตัวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น (Cecen et al., 2012) และพันธะที่เกิดการดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ (Arup and SenGupta, 2002)

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการกำจัด โลหะหนักในน้ำเสีย

วิธีการกำจัดโลหะหนัก	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
Coagulation/ Flocculation	กำจัดความขุ่น และ Dewatering	ตะกอนเพิ่มขึ้น	(Fu et al., 2011)
Precipitation	ดำเนินการง่าย และต้นทุนต่ำ	เกิดตะกอนและมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณต่ำ	(Fu et al., 2011)

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (ต่อ)

วิธีการกำจัดโลหะหนัก	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
Ion exchange	บำบัดได้สูง ประสิทธิภาพการกำจัดสูง กระบวนการเร็ว	ต้นทุนสูง และเกิดมลพิษจากการ regenerated เรซิน	(Fu et al., 2011)
Membrane filtration	ประสิทธิภาพสูง ไม่ใช้สารเคมี ไม่เกิดขยะมูลฝอย	ต้นทุนการดำเนินการสูง การซึมผ่านต่ำ	(Barakat, 2011)
Electrochemical treatment	กระบวนการรวดเร็ว ใช้สารเคมีต่ำ ผลิตตะกอนน้อย	ต้นทุนสูง และใช้พลังงานสูง	(Barakat, 2011)
Adsorption	ง่ายต่อการดำเนินการ กระบวนการสามารถกำหนดช่วง pH ได้กว้าง ต้นทุนต่ำ	เกิดของเสีย	(Fu et al., 2011)

2.5 ยางรถยนต์

2.5.1 องค์ประกอบยางรถยนต์

ยางรถยนต์ประกอบด้วยยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ คาร์บอนแบล็ค ฟ้าไบ เหล็กเส้น (เพิ่มความแข็งแรง และความต้านทานของยางรถยนต์) ซัลเฟอร์ และซิงค์ออกไซด์ (ตารางที่ 2.5) ยางรถยนต์ที่ใช้แล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การผลิตปิโตรเลียมหรือเชื้อเพลิงในขั้นตอนดังกล่าวพบมีคาร์บอนแบล็คเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ซึ่งคาร์บอนแบล็คสามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ได้ (Williams, 2013) และสามารถใช้ดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Gupta et al., 2012a; 2013b; Saleh et al., 2013; Karmacharya et al., 2016)

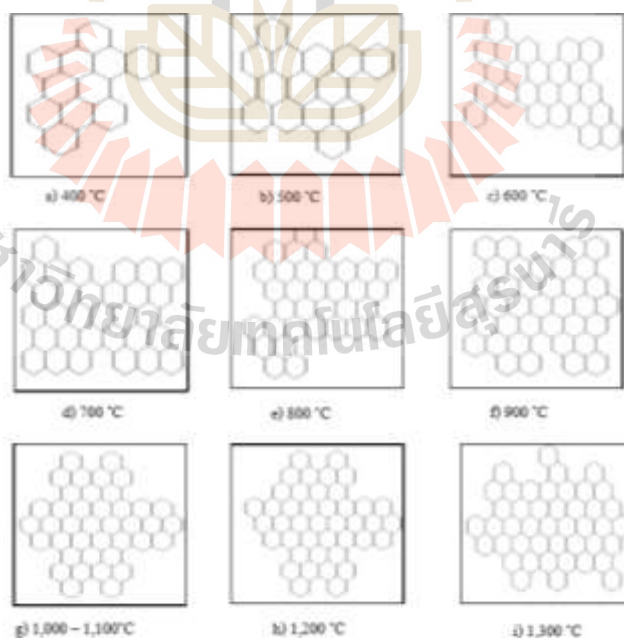
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของยางรถยนต์ (Amari, Themelis, and Wernick 1999)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Styrene butadiene	62.1
Carbon black	31.0
Extender oil	1.9
Zinc oxide	1.9
Stearic acid	1.2
Sulfur	1.1
Accelerator	0.7

โครงสร้างยางรถยนต์ประกอบด้วย ดอกยาง โครงผ้าใบหรือดอกยาง ไหล่ยาง แก้มยาง ผ้าใบเสริมหน้ายางหรือเข็มขัดรัดหน้ายางและขอบยาง มีหน้าที่ต่างกันคือ ดอกยางทำหน้าที่จับกับถนน ไหล่ยางเป็นส่วนที่หนาที่สุดทำหน้าที่ป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับ โครงยาง แก้มยางทำหน้าที่ให้ความยืดหยุ่น ผ้าใบเสริมหน้ายางทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงและรับแรงกระแทกและป้องกันไม่ให้ยางชำรุด ขอบยางทำหน้าที่ยึดปลายทั้งสองข้างของ โครงยาง (Dixon, 1996)

2.5.2 กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันคือการไพโรไลซิส (Chen, 2017; Cecen et al., 2012) เป็นการย่อยสลายสารด้วยความร้อนในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยเพื่อไม่ให้วัสดุติดไฟและกลายเป็นเถ้า ในระหว่างการคาร์บอนไนซ์เซชัน ธาตุออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ สารทาร์และไฮโดรคาร์บอน เกิดการระเหยกลายเป็นแก๊ส ส่วนของแข็งที่เหลือจากกระบวนการคือ ถ่านหรืออะตอมคาร์บอน (Chen, 2017; Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005) ซึ่งพบว่ารูพรุนมีปริมาณน้อยส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ จึงจำเป็นต้องมีการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวหรือรูพรุนในการดูดซับ หากใช้ความร้อนในการกระตุ้น อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นมีผลต่อการเพิ่มปริมาตรของรูพรุน (ภาพที่ 2.6) (Bansal et al., 2005; Chen, 2017)

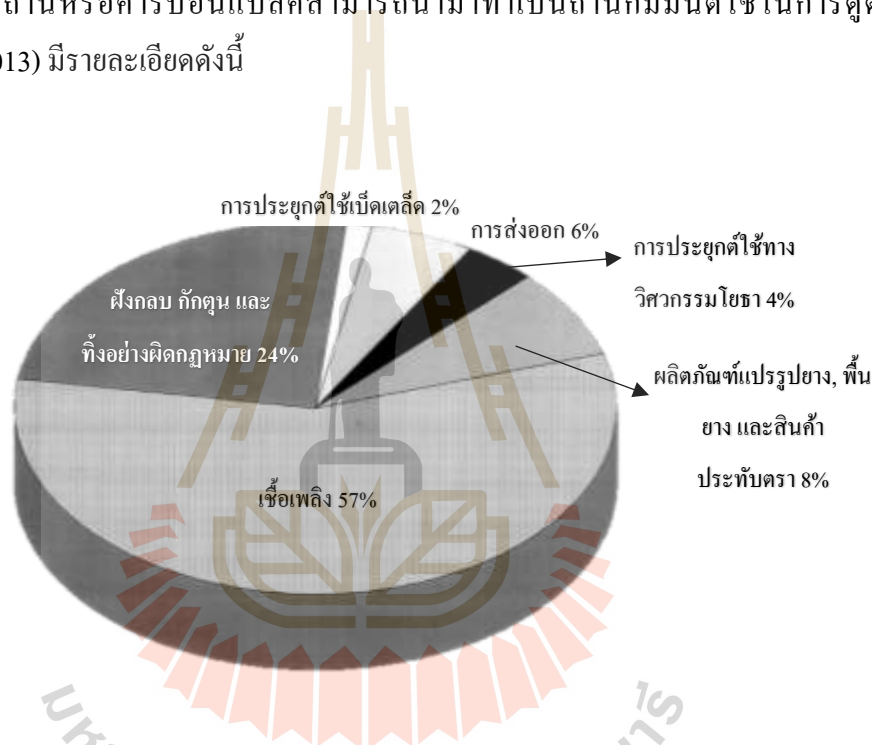


ภาพที่ 2.6 การเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เซชันต่างๆ

(Hassler, 1974)

2.5.3 การไฟโรไลซิสยางรถยนต์

ปัจจุบันปริมาณขยะจากยางรถยนต์มีปริมาณมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วไปฝังกลบ ต่อมามีการพัฒนานำมาใช้ประโยชน์ เช่น ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ ทำถนน ทำสนามกีฬา และที่สำคัญคือ การนำมาผลิตเชื้อเพลิง (ภาพที่ 2.7) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงคือกระบวนการไฟโรไลซิสโดยใช้อุณหภูมิในการเผา 400-900 องศาเซลเซียส ในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยเพื่อให้ยางรถยนต์สลายตัว ผลผลิตที่ได้จากการเผาคือ น้ำมันเตาร้อยละ 45 แก๊สร้อยละ 20 ลวกร้อยละ 10 และกากคาร์บอนหรือคาร์บอนแบล็คร้อยละ 25 ซึ่งมีการศึกษาว่าถ่านหรือคาร์บอนแบล็คสามารถนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ใช้ในการดูดซับได้ (Williams, 2013) มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2.7 การกำจัดและการใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (Amari et al.,1999)

2.5.3.1 คาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คคือ เขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายภายใต้การควบคุมเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอนอาจพบการปนเปื้อนสาร เช่น กลุ่มฟลูออรีน แบ่งกลุ่มของคาร์บอนแบล็คตามกระบวนการผลิตแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม ดังนี้ (Donnet, Bansal, and Wang, 1993)

1.1 Channel black กระบวนการเป็นแบบระบบปิด

1.2 Furnace black กระบวนการใช้อุณหภูมิสูง กระบวนการที่ใช้คือกระบวนการ

Thermal-oxidative decomposition

1.3 Acetylene black กระบวนการเป็นแบบระบบปิด โดยกระบวนการที่ใช้คือ กระบวนการ Thermal decomposition

1.4 Lamp black กระบวนการเป็นแบบระบบปิด โดยกระบวนการที่ใช้คือ Thermal-oxidative decomposition

1.5 Thermal black กระบวนการเป็นแบบระบบปิด โดยกระบวนการที่ใช้คือ กระบวนการ Thermal decomposition

2.5.3.2 คุณสมบัติของคาร์บอนแบล็กจากยางรถยนต์

คุณสมบัติของคาร์บอนแบล็กจากยางรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นของแข็งที่เหลือจากการเผาเพื่อผลิตปิโตรเลียมหรือเชื้อเพลิง (ตารางที่ 2.6) คาร์บอนแบล็กที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผา สามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักได้เพราะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของคาร์บอนแบล็กจากยางรถยนต์

คุณสมบัติ	Martinez et al., (2015)
ความชื้น (%)	1.28
จีเถ้า (%)	14.58
สารระเหย (%)	6.92
คาร์บอน (%)	80.82

2.5.3.3 หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ส่วนใหญ่วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR spectrophotometer หมู่ฟังก์ชันที่พบคล้ายกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งมีพื้นผิวเป็นประจุลบ โดยเกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ (Gupta et al., 2012) รายละเอียดดังตารางที่ 2.7 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆ นี้จะทำให้เกิดการดูดซับ

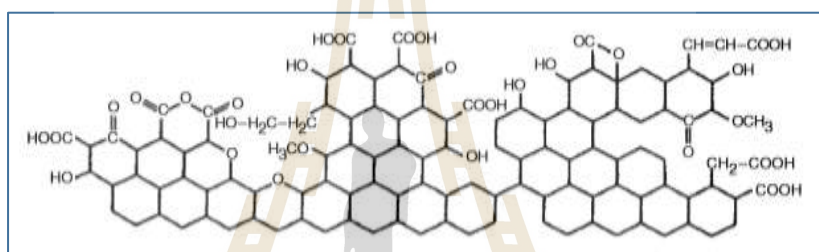
ตารางที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	การกระตุ้น	ความยาวคลื่นของ เครื่อง FTIR (ซม. ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	แหล่งอ้างอิง
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	เผากระตุ้น	4000-500	- OH (กลุ่มของฟีนอล) - C=O (กลุ่มของเอสเทอร์)	(Gupta et al., 2012)
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	เผากระตุ้น ด้วย N ₂	4000-400	- O-H (กลุ่มไฮดรอกซิล) - C≡C (กลุ่มแอลไคน์) - C=O (กลุ่มคาร์บอกซิล)	(Gupta et al., 2013)
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	เผากระตุ้น	4000-400	- C-O (กลุ่มคาร์บอนิว) - C=O (กลุ่มคาร์บอกซิล) - O-H (กลุ่มไฮดรอกซิล) - C≡C (กลุ่มแอลไคน์)	(Saleh et al., 2013)
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	เผากระตุ้น ด้วย N ₂	4000-400	- OH (กลุ่มของฟีนอล) - C=O (กลุ่มคาร์บอกซิล) - C-O (กลุ่มคาร์บอนิว) - C-H (กลุ่มแอลคีน ไฮโดรคาร์บอน)	(Karmacharya et al., 2016)

2.6 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึงการนำวัสดุดิบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัสดุดิบนั้นมีรูพรุน และพื้นที่ผิวภายในสูง รูพรุนมีขนาดและรูปร่างต่างกันและมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ โครงสร้างประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนอะตอมรูปหกเหลี่ยม ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 88 ไฮโดรเจนร้อยละ 0.5 ไนโตรเจนร้อยละ 0.5 ซัลเฟอร์ร้อยละ 1 และออกซิเจนร้อยละ 6-7 โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (Bansal et al., 2005) ซึ่งคาร์บอนสามารถเกิดพันธะกับอะตอมของธาตุอื่นได้ หมู่ฟังก์ชันที่พบบนผิวของถ่านกัมมันต์ เช่น Carboxyl, Phenolic hydroxyl, Quinonoid, Normal lactone, Fluorescein-type lactone และ Carboxylic acid anhydride เป็นต้น (Bansal et al., 2005; Arup and SenGupta, 2002) (ดังภาพที่ 2.8 และตารางที่ 2.8) คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์คือ พื้นผิวมีรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดหรือดูดซับ สี กลิ่น สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากพื้นผิวเป็นประจุลบ (COO⁻) (Bansal et al., 2005; Cecen et al., 2012) คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิว 800-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (Bansal et

al., 2005) ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้โดยใช้วิธีการดูดซับความสามารถของการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสภาวะในการดูดซับ (Cecen et al., 2012) ถ่านกัมมันต์นิยมทำจากวัตถุดิบที่ราคาไม่แพงและมีปริมาณคาร์บอนสูง (Bansal, Donnet and Stoeckli, 1988) เช่น ข้าวโพด เปลือกส้ม เปลือกมะพร้าว แกลบข้าว ไม้ ถ่านหิน และของเสีย เป็นต้น (ตารางที่ 2.9) ของเสียที่นำมาทำถ่านกัมมันต์ เช่น ของเสียจากกระบวนการของอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมน้ำมันหล่อลื่น ปัจจุบันพบการนำคาร์บอนแบล็คจากการไพโรไลซิสยางรถยนต์มาทำเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบมีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลร้อยละ 98 และโครเมียมกับตะกั่วมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 80 (Gupta et al., 2012a; 2013b; Mousavi et al., 2010; Bansal, Donnet, and Stoeckli, 1988)






ภาพที่ 2.8 หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ (Bansal et al., 2005)

ตารางที่ 2.8 พันธะของหมู่ฟังก์ชัน (Bansal, et al., 2005)

วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ	พันธะของหมู่ฟังก์ชัน	อ้างอิง
Cellulose char	Aromatic (C-H)	(Studebaker et al., 1957)
Coal	Aliphatic stretch (CH ₂ & CH ₃)	(Matsumura et al., 1976)
Carbon black	Lactone	(Garten et al., 1957)
Activated carbon	Carbonyl (R-C-R')	(Donnet et al., 1993)
Pyrolyzed polymer	Carbonyl (R-C-R')	(Sherman et al., 1932)
Activated carbon	stretch (C=O), carboxyl (R-C-R')	(Friedel et al., 1972)
Cellulose char	stretch (C=O)	(Studebaker et al., 1957)
Carbon black	Lactone	(Emmett et al., 1948)
Cellulose char	stretch (C=O)	(Studebaker et al., 1957)
Channel black	Carboxyl (R-C-R')	(Garten et al., 1957)
Channel black	Carbonyl (R-C-R') หรือ aromatic group (C-H)	(Gardner et al., 1996)

ตารางที่ 2.8 พันธะของหมู่ฟังก์ชัน (Bansal, et al., 2005) (ต่อ)

วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ	พันธะของหมู่ฟังก์ชัน	อ้างอิง
Activated carbon	Aromatic structures (C-H) and unconjugated carbonyl	(Donnet et al., 1993)
Pyrolyzed polymer	Lactone	(Bansal et al., 1980)
Pyrolyzed polymer	Lactone	(Bansal et al., 1980)
Carbon black	Quinone ()	(Emmett et al., 1948)
Activated carbon	stretch (C=O), carboxyl (R-C-R')	(Friedel et al., 1972)
Cellulose char	Methylene (CH ₂)	(Studebaker et al., 1957)
Activated carbon	Phenol ()	(Friedel et al., 1972)
Activated carbon	vibration lactone (C-O-C)	(Friedel et al., 1972)
Cellulose char	Aromatic (C=O)	(Studebaker et al., 1957)
Channel black	stretch (C-O)	(Gardner et al., 1996)
Activated carbon	adsorption (C-O) หรือ phenoxy adsorption	(Donnet et al., 1993)
Channel black	Condensed aromatic ring หรือ H-bonded, conjugated carbonyl	(Boehm et al., 1959)
Carbon black	Phenol ()	(Studebaker et al., 1957)
Activated carbon	stretch (C-O)	(Studebaker et al., 1957)

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับ (Barakat, 2011)

ตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)					
	Pb	Cd	Zn	Cu	Cr	Ni
ข้าวโพดและแกลบ	456	493.7	495.9	N.D.	N.D.	N.D.
เปลือกส้ม	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	158
เปลือกมะพร้าว	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3.65	N.D.
แกลบข้าว	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.79	N.D.
Ulva lactuca	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	112.3	N.D.
Nostoc specie	93.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bacillus – bacterial biomass	467	85.3	418	381	39.9	N.D.

หมายเหตุ เครื่องหมาย N.D. (Not detected) หมายถึง ไม่ได้ทำการศึกษา

2.6.1 การกระตุ้น (Activation)

ขั้นตอนกระบวนการนำคาร์บอนแบล็กมากระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีรูพรุนมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยวิธีการกระตุ้นแบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้

1. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical/Thermal activation) คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีแก๊สออกซิไดซ์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนและไอน้ำในการกระตุ้น เป็นต้น เป็นการเพิ่มรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) หรือขนาดกลาง (Mesopore) โดยรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเกิดจากอะตอมของคาร์บอนถูกทำลายโครงสร้างเนื่องด้วยความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้ดูดซับได้ดีไม่มีสารเคมีตกค้าง ไม่เป็นอันตราย ต้นทุนต่ำ ข้อเสียคือวัสดุอุปกรณ์หายากเพราะต้องมีกระบวนการที่เฉพาะเจาะจง (Marsh et al., 2006; Fu et al., 2011; Bansal et al., 2005; Pejman, Kit, Jiabin, Huaimin, and Gordon, 2016; Chen, 2017)

2. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) คือการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยการใช้กรดหรือด่าง เช่น กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟูริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ผิวของตัวดูดซับมีประจุลบ ซึ่งโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมีประจุบวก หากทำการดูดซับ โลหะหนักในน้ำเสียจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับผิวของตัวดูดซับเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ข้อดีคือสะดวกและง่ายต่อการทำการทดลอง ข้อเสียคือถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ส่งผลให้มีสารเคมีตกค้าง ทำให้ใช้เวลาในการล้างนาน และต้นทุนในการผลิตสูง (Fu et al., 2011; Bansal et al., 2005)

2.6.2 ลักษณะรูพรุน

รูพรุนของถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ Micropores มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm Mesopores มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2-50 nm และ Macropores มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 nm (Bansal et al., 2005; Cecen et al., 2012)

1. Micropores มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ คิดเป็นร้อยละ 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ ความสามารถในการดูดซับขึ้นกับขนาดของสารมลพิษ ซึ่งขนาดต้องไม่ใหญ่เกินกว่าขนาดโมเลกุลของ Micropores มีความสำคัญในการดูดซับมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นๆ เพราะมีพื้นที่และพลังงานในการดูดซับมากที่สุด ทำให้ที่ความดันต่ำๆ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เหมาะสำหรับการดูดซับแก๊สและไอระเหยมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

2. Mesopores มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ คิดเป็นร้อยละ 5 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ยกตัวอย่างตัวดูดซับที่มีรูพรุนเป็น Mesopores เช่น ซิลิกาเจล อะลูมินาเจล และอะมิโนซิลิเกตอะคทีฟ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ถึง 50 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวสูงสุด 200 ตารางเมตรต่อกรัม

3. Macropores ไม่มีความสำคัญกับการดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย มีพื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม

2.6.3 คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (ตารางที่ 2.10) เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ เช่น การกำจัดสาร การแยกสาร และการทำให้สารบริสุทธิ์ เป็นต้น (Baccar et al., 2009) ซึ่งคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดผงได้กำหนดไว้สองข้อตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ คือค่าการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าความหนาแน่นปรากฏอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) และถ่านกัมมันต์ทั่วไปมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ศึกษาโดยใช้วิธีดังนี้

1.1 ค่าไอโอดีน (Iodine number) ใช้ประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก โดยวิธีการดูดซับไอโอดีน จากการพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ถ้าค่าไอโอดีนนับเบอ์สูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก หน่วยค่าการดูดซับคือมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

1.2 ความหนาแน่นหรือความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) คือเป็นค่าความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถบอกประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ หากค่าความหนาแน่นต่ำปริมาตรรูพรุนจะสูงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารได้ดี

2. ขนาดรูพรุน (Pore size) ศึกษาโดยใช้วิธีดังนี้

2.1 ค่าโมลาส (Molass number) ใช้ประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดมากกว่า 20 อังสตรอม โดยทั่วไปควรมีค่ามากกว่า 400 อังสตรอม ถ้าค่าโมลาสมีค่ามากแสดงว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อยลงแต่สามารถดูดซับโมเลกุลได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2.2 แทนนิน (Tannin) เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และขนาดกลาง มีโครงสร้างซับซ้อน เป็นค่าที่บอกการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่และโมเลกุลขนาดกลางมีค่าอยู่ในช่วง 200-362 มิลลิกรัมต่อลิตร

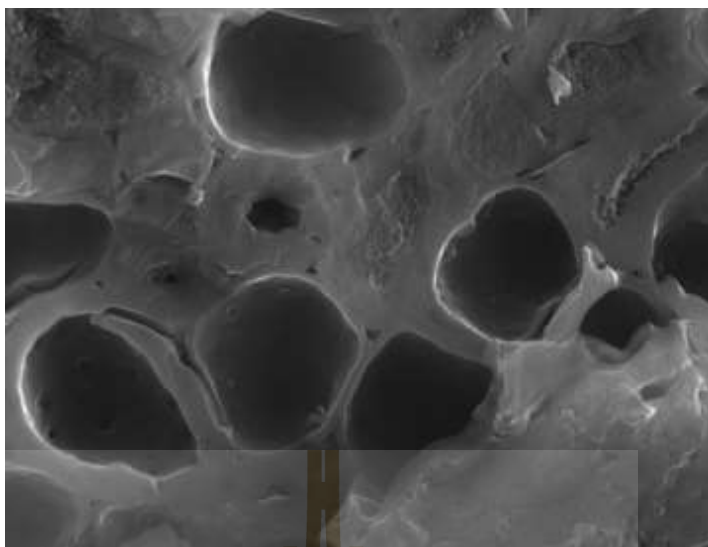
2.3 เมทิลีนบลู (Methylene blue) เป็นสารที่ให้สีที่มีโมเลกุลขนาดกลางนำมาใช้ในการให้ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนไม่ใหญ่มากดูดซับ ซึ่งค่านี้จะระบุในหน่วยน้ำหนักกรัมของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 100 กรัม

3. ค่าความแข็งและค่าการขัดถู (Hardness and abrasion number) เป็นค่าที่บอถึงความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดทาน และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและการกระตุ้น

4. ปริมาณเถ้า (Ash content) วัตถุดิบที่นำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ต้องมีปริมาณเถ้าต่ำ เมื่อกระตุ้นจะทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสูงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ดูดซับสาร

5. ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride activity) เป็นสารอินทรีย์อันตรายที่ระเหยง่ายในการดูดซับไอของสารของถ่านกัมมันต์ในสภาวะอิมตัวทำให้ทราบคุณสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

6. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง หรือ FE-SEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดนี้มีความละเอียดสูงสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความหนาได้ ส่วนใหญ่ใช้ศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาคโดยมีกำลังขยายสูงถึง 25-1,000,000 เท่า ซึ่งใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการวิเคราะห์หรือสแกนชิ้นงานสามารถต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานคือ EDX เพื่อช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบของธาตุที่ต้องการศึกษาเช่น คาร์บอน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ เป็นต้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีเลนส์อิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มีความละเอียด (Resolution) 0.8 นาโนเมตร ที่ 15 kV และ 1.2 นาโนเมตรที่ 1 kV เหมาะสำหรับงานทางกายภาพ สักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอนใช้ Sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (Sample chamber) ใช้ Diffusion pump หัววัดหลักสำหรับวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบประกอบด้วย 3 หัววัดคือ Secondary electron detector, Backscattered electron detector และ Scanning transmission electron detector FE-SEM ที่หัววัดต่างกัน ได้แก่ Secondary electron image (SEI), backscattered electron image (BEI) และ Transmission electron image (Egerton, 2007) ซึ่งภาพที่ได้แสดงในรูปแบบเชิงพื้นที่ (ภาพที่ 2.9)



ภาพที่ 2.9 SEM ของถ่านกัมมันต์ (Kwiatkowski and Broniek, 2017)

7. ลักษณะพื้นผิว (Texture) ศึกษาด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (Brunauer, Emmett and teller: BET) เพื่อศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ก่อนกระตุ้นและหลังกระตุ้น ด้วยเครื่อง BET ซึ่งเป็นการศึกษาคุนสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง ใช้หลักการการดูดซับแก๊สไว้บนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยการใช้ในโตรเจนเหลวและอุณหภูมิของเครื่องประมาณ 77 เคลวิน (-196°C) ตามทฤษฎีของ BET มีสมมุติฐานว่าการดูดซับแก๊สเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิว และแก๊สที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการเกิดการดึงดูดกันเองของแก๊ส ในการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของการใช้ BET สามารถสังเกตได้จากตัวบ่งชี้จากการทดสอบคือ ลักษณะกราฟต้องเป็นเส้นตรงค่าคงที่ของ C อยู่ในช่วง 50-300 ค่า Coefficient of correlation มีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 0.995 และค่าความดันสัมพัทธ์ที่เป็นที่ยอมรับเพื่อการแสดงผลควรอยู่ในช่วง 0.05-0.35 (Bansal et al., 2005) ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีพื้นที่ผิว 500-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม (Bansal et al., 2005) และการศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง BET สามารถศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับได้ (Brunauer Emmett and Teller (BET) isotherm) ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับจำแนกได้ 6 ประเภทด้วยกัน (ภาพที่ 2.10) มีรายละเอียดดังนี้ (Bansal et al., 2005; Marsh et al., 2006)

1. Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวหรือแบบแลงเมียร์เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ เป็นการดูดซับทางกายภาพและเคมี การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ

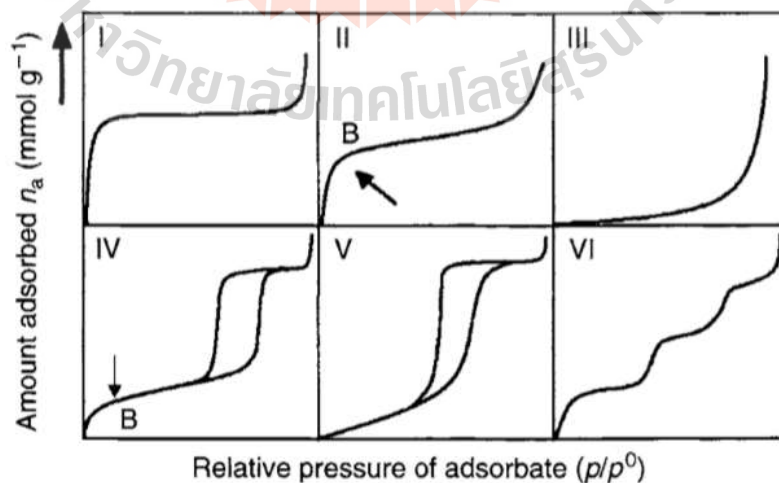
2. Type II เป็นไอโซเทอร์มรูปตัวเอสส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับตัวดูดซับที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ จุดเปลี่ยนกราฟเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับเกือบเต็มพื้นที่ เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้เกิดการดูดซับมากกว่าหนึ่งชั้น ซึ่งเรียกรูปการดูดซับแบบนี้ว่าการดูดซับแบบหลายชั้น

3. Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟมีลักษณะคล้ายกระจกเงา โดยไอโซเทอร์มประเภทนี้ไม่ค่อยพบเนื่องจากการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุนและของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่แต่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะทำให้เกิดแรงดึงดูดกันเองระหว่างตัวถูกดูดซับ ทำให้การดูดซับมากขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์สูง

4. Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากสุดในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง กราฟในช่วงแรกจะคล้ายกับประเภทที่ 2 ซึ่งมีความดันสัมพัทธ์ต่ำ จากนั้นเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น การดูดซับก็เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการควบแน่นแคปิลารีขึ้นในรูพรุน ข้อมูลการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุนในของแข็งที่มีขนาดรูพรุนขนาดกลางได้

5. Type V คล้ายไอโซเทอร์มประเภทที่ 4 (Type IV) ต่างกันที่เกิดการควบแน่นในรูพรุนไอโซเทอร์มประเภทนี้พบเกิดขึ้นน้อย

6. Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได ซึ่งไอโซเทอร์มประเภทนี้พบน้อย ส่วนใหญ่พบในการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวที่คล้ายกัน รูปร่างของไอโซเทอร์มขึ้นกับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ



ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Marsh et al., 2006)

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (Harry, 2001)

ลำดับที่	คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์	ปริมาณ
1	ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส	500-2,500 m ² /g
	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่	0.5-2.5 cm ³ /g
2	ค่าความแข็ง	50-100
3	ปริมาณเถ้า	1-20 %wt
4	ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์	35-125
5	ค่าไอโอดีน	500-1,200 mg/g
6	ค่าโมลาส	300-1,500 ingsdom
7	ค่าความจุความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส	0.84-1.3 J/g-K
8	ค่านำความร้อน	0.05-0.1 W/m-K

2.6.4 ประเภทของถ่านกัมมันต์

2.6.4.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทผง (Powdered activated carbon; PAC) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.015-0.025 มิลลิเมตร มีขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร และพบว่าที่เนเธอร์แลนด์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง 23-40 % มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรและ 10-18 % พบมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 74 ไมโครเมตร มีสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาณมาก อัตราการดูดซับสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้สามารถบำบัดน้ำเสียได้ (Cecen et al., 2012) และพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ไปใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น นิกเกิล ในน้ำเสียอุตสาหกรรมประสิทธิภาพการกำจัดคือร้อยละ 98 ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้สามารถดูดซับได้เร็วแต่ยากในการทำ fixed bed เป็นสาเหตุทำให้เกิดความดันลดต่ำลงอย่างสูงทำให้เกิดการติดขัดใน fixed beds (Bansal et al., 2005; Gupta et al., 2012) คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชนิดนี้มี 2 อย่างด้วยกันคือ ความสามารถในการกรองได้และความหนาแน่นมาก คุณสมบัติสามารถกรองได้นั้นเพื่อไม่ทำให้ตัวดูดซับผ่านชั้นกรองเนื่องจากอาจส่งผลทำให้เกิดการปนื้อนตัวดูดซับไปกับน้ำทิ้งหลังบำบัด และความหนาแน่นมากนั้นคือ มวลของตัวดูดซับต่อปริมาตร ระยะเวลาในการกรองขึ้นกับปริมาณของตัวดูดซับ ลักษณะของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ตารางที่ 2.11)

ตารางที่ 2.11 ลักษณะของถ่านกัมมันต์ประเภทผงที่มีในท้องตลาด (Hager et al., 1998)

พารามิเตอร์	PAC1	PAC2	PAC3	PAC4	PAC5	PAC6
ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก.)	800	1,199	600	900	1,000	550
ค่าโมลาส	9	N.D.	N.D.	14	18	N.D.
ความชื้น (ร้อยละ)	5	3	5	10	10	4
ความหนาแน่นปรากฏ (ก./ลบ.ซม.)	0.64	0.54	0.74	0.38	0.38	0.50
เถ้า (ร้อยละ)	N.D.	6	N.D.	3-5	3-5	N.D.

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

PAC (Powdered activated carbon) หมายถึง ถ่านกัมมันต์ประเภทผง

2.6.4.2 ถ่านกัมมันต์ประเภทเกล็ด (Granular activated carbon; GAC) มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ประเภทผง นิยมนำไปดูดซับไอของสารหรือแก๊ส ง่ายต่อการ Regenerated กลับมาใช้ใหม่แต่มีราคาแพงเมื่อเทียบกับประเภทผง (Bansal et al., 2005)

2.6.4.3 ถ่านกัมมันต์ประเภทแท่ง (Extruded activated carbon; EAC) เกิดจากการนำถ่านกัมมันต์เข้าเครื่องอัดรีดทำให้มีรูปทรงเป็นแท่งเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8-4.5 มิลลิเมตร เหมาะสำหรับการดูดซับแก๊สถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการบำบัดหรือกำจัดน้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นประเภทเกล็ดและประเภทผง โดยเฉพาะในน้ำเสียอุตสาหกรรมชุบโลหะพบว่ามีการใช้ถ่านกัมมันต์ประเภทผงมากกว่าประเภทเกล็ด (ดังตารางที่ 2.12)

ตารางที่ 2.12 การใช้ถ่านกัมมันต์ทางด้านน้ำ (Burchell, 1999)

แหล่งที่ใช้ถ่านกัมมันต์	GAC (ตัน)	PAC (ตัน)
น้ำดื่ม	4.5	13.6
น้ำเสียอุตสาหกรรม	6.4	6.6
น้ำเสียชุมชน	0.9	2.0
การทำให้สีอ่อนลง	6.8	9.1
กระบวนการทางเคมี	4.1	2.3
อาหาร เครื่องดื่ม น้ำมัน	0.9	3.9
ยา	2.0	0.3
เหมืองแร่	1.6	2.5
น้ำบาดาล	0.9	2.3
ครัวเรือน	1.4	0.9
ซักแห้ง	0.7	0.4
ชุบโลหะ	0.2	0.4

หมายเหตุ GAC หมายถึง ถ่านกัมมันต์ประเภทเกล็ด

PAC หมายถึง ถ่านกัมมันต์ประเภทผง

2.7 ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon; PAC) ใน

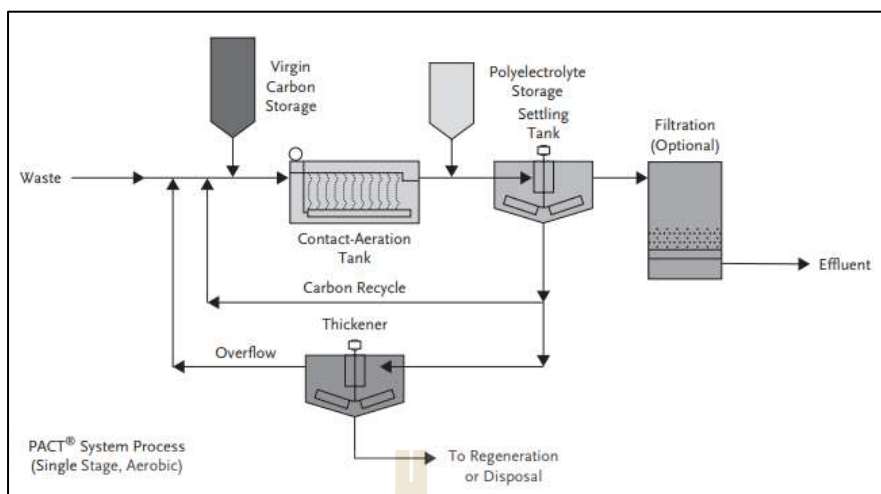
การบำบัด ระบบที่ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในการบำบัดน้ำเสียมีหลายระบบด้วยกัน มีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge process) การใช้ถ่านกัมมันต์ประเภทผงในระบบตะกอนเร่ง (ภาพที่ 2.11) ในระบบจะพบมีการเติมอากาศโดยถังเติมอากาศ ถ่านกัมมันต์ถูกเติมเข้าระบบที่ถังเติมอากาศในรูปของสไลด์จ์ ซึ่งปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารมลพิษ หลังจากเติมอากาศแล้ว น้ำเสียที่ถูกผสมกับถ่านกัมมันต์จะเข้าสู่ถังตกตะกอน หากของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็กกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำเป็นต้องผ่านการกรองก่อนปล่อยออกจากระบบ และตะกอนจากระบบจะถูกทิ้งซึ่งตะกอนที่ถูกทิ้งพบว่ามีถ่านกัมมันต์ผสมอยู่ด้วยจึงจำเป็นต้องเติมถ่านกัมมันต์เข้าระบบที่ถังเติมอากาศ เพื่อรักษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ในระบบ (Cecen et al., 2012)

2.7.1.1 พารามิเตอร์ระบบตะกอนเร่ง

พารามิเตอร์ของระบบขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียและข้อกำหนดของคุณภาพน้ำทิ้ง มีรายละเอียดดังนี้

1. Hydraulic Retention Time (HRT)
2. Sludge Retention Time (SRT)
3. Carbon dose
4. Carbon type



ภาพที่ 2.11 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) (Cecen et al., 2012)

2.7.2. ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

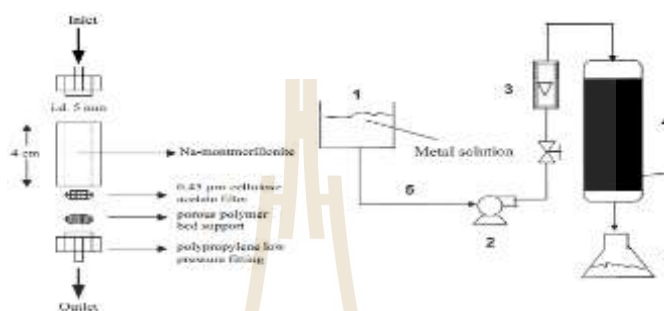
2.7.2.1 ระบบตัวกลางลอยตัวแบบใช้อากาศ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกับการใช้ Membrane bioreactor ในการบำบัดน้ำเสีย โดยกระบวนการเป็นการดูดซับและการย่อยสลายทางชีวภาพสามารถใช้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในการบำบัด ซึ่งมีการเติมอากาศในระบบ ระบบนี้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง ดำเนินการในอุณหภูมิตามสภาพอากาศ หากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำเกินไปจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและประสิทธิภาพการกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$ และ COD จะต่ำลง แต่ทั้งนี้หากใช้ PAC ร่วมด้วยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรนได้ ขณะเดียวกันยังสามารถกำจัด 2-methylisoborneol เพิ่มขึ้นร้อยละ 25 (Kim, Lee, Hwang, Cho, Kim, and Noh, 2014) ระบบนี้คล้ายกับการผสมเร็ว (Rapid mix) ของถ่านกัมมันต์กับน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการบำบัด (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) ข้อดี คือกระบวนการง่าย มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในระบบ ข้อเสีย คือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ราคาแพง ทำให้ต้องเปลี่ยนเมมเบรนบ่อยครั้ง

2.7.3. ระบบคอลัมน์ (Column)

ระบบคอลัมน์ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) สามารถใช้กำจัดหรือบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับแบบการกรอง (Filter) (ภาพที่ 2.12) ตัวดูดซับเรียกอีกอย่างว่ามีเดีย (Media) เช่น ถ่านกัมมันต์และทราย งานวิจัยนี้ใช้การดูดซับด้วยถ่านหรือถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพและเคมี ส่วนใหญ่ถ่านที่ใช้มี 2 ลักษณะคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular carbon) และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered carbon) ปัจจัยสำคัญคือ ค่าความเป็น

กรดต่าง อัตราการไหล เพื่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ภายในคอลัมน์มีชั้นของตัวดูดซับ และชั้นกรอง เพื่อป้องกันการสูญเสียตัวดูดซับที่อยู่ภายในคอลัมน์ จากงานวิจัยพบว่าชั้นของตัวดูดซับในคอลัมน์นั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อชั้นของตัวดูดซับสูงขึ้นแต่ระยะเวลาในการบำบัดจะช้าลง สามารถเดินระบบได้ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยระบบประกอบด้วยถังน้ำเสีย บั้มสูบน้ำ วาล์วน้ำ มิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ คอลัมน์และถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2.12 ระบบคอลัมน์ (Zulfadhly, Mashitah, and Bhatia, 2001; Abollino, Aceto, Malandrino, Sarzanini, and Mentasti, 2003)

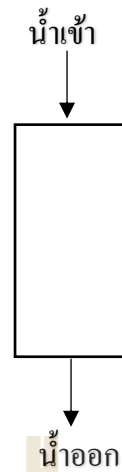
2.7.3.1 ระบบคอลัมน์แบบการดูดซับ

ระบบนี้เป็นระบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบการกรอง ซึ่งระบบการดูดซับมีรายละเอียดดังนี้

1. ระบบดูดซับแบบเท คือเป็นการใช้ถ่านหรือถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสียในช่วงระยะเวลาหนึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ขนาดของถ่านดูดซับ และการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์กับสารปนเปื้อน แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบขั้นตอนเดียวและแบบไหลสวนกัน

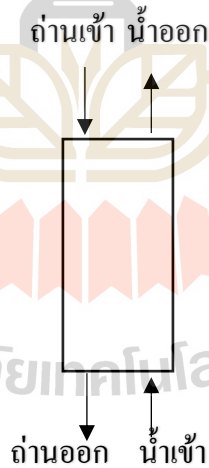
2. ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง คือเป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียปริมาณมาก แบ่งเป็น 3 แบบ

2.1) แบบชั้นตรึง (Fixed bed) ระบบนี้น้ำจะไหลจากบนลงล่างผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ที่อยู่กับที่ซึ่งจะเกิดการดูดซับจากชั้นบนลงชั้นล่างของถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 2.13)



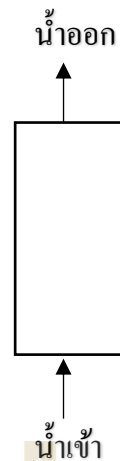
ภาพที่ 2.13 แบบชั้นตรึง (Fixed bed)

2.2) แบบชั้นเคลื่อนที่ (Moving bed) ระบบนี้ให้น้ำเสียไหลขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนตัวดูดซับบริเวณก้นถัง ระบบนี้ประสิทธิภาพสม่ำเสมอ แต่ระบบนี้ไม่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสีย นิยมใช้ในการแยกแก๊สไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม (ภาพที่ 2.14)



ภาพที่ 2.14 แบบชั้นเคลื่อนที่ (Moving bed)

2.3) แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed) ระบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วที่มากพอให้ถ่านกัมมันต์เกิดการแขวนลอยในระบบได้ ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบชั้นตรึง ข้อดีคือสามารถปรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้มากกว่า และสามารถใช้อ่างกัมมันต์ขนาดเล็กกว่าได้ (ภาพที่ 2.15)



ภาพที่ 2.15 แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed)

2.7.3.2 พารามิเตอร์ระบบคอลัมน์แบบการดูดซับ

ในระบบการดูดซับแบบใช้คอลัมน์ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการเดินระบบ ประกอบด้วย ระยะเวลาสัมผัส ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ อธิบายโดยการใช้สมการดังต่อไปนี้

(Metcalf and Eddy, 2004)

$$EBRT = \frac{V}{Q}$$

V คือ ปริมาตรของคาร์บอนในระบบ (m^3)

Q คือ อัตราการไหล (m^3/h)

EBRT คือ Empty bed residence time (h)

ตารางที่ 2.13 พารามิเตอร์ระบบคอลัมน์แบบการดูดซับ

(เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2542; Hager et al., 1998)

พารามิเตอร์	หน่วย
ขนาดของถ่านดูดซับ	Mesh
ชั้นของถ่านดูดซับ	เมตร (50%)
ภาระการไหล	ลบ.ม/ (ตร.ม.นาท)
เวลากักเก็บ	นาท
อัตราไหลย้อน	ลบ.ม/ (ตร.ม.นาท)
ปริมาณคาร์บอนที่ต้องการ	กรัม/ลบ.ม.

2.7.3.3 ข้อดีข้อเสียของระบบคอลัมน์แบบการดูดซับ

ข้อดีคือ สามารถบำบัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้ ระบบง่ายต่อการดำเนินการ ตัวกลางที่ใช้สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ ข้อเสีย คือระบบอาจเกิดความดันลดลงบางช่วง (Pressure drop หรือ Head loss) ระบบการดูดซับที่ใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงมีข้อดีข้อเสียต่างกัน (ตารางที่ 2.14)

ตารางที่ 2.14 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการของระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC)
(Edzwald, 2011)

วิธีการของระบบดูดซับ	ข้อดี	ข้อเสีย
Intake	ระยะเวลาสัมผัสนาน และการผสมกันดี	ใช้ตัวดูดซับเยอะ
Rapid mix	การผสมกันดี ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาสัมผัส	อัตราการดูดซับลดลงได้รับการรบกวนจากการตกตะกอน ระยะเวลาสัมผัสสั้น ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์
Filter inlet	เวลาเพียงพอสำหรับการดูดซับแบบเต็มความสามารถของ PAC	PAC อาจจะถูกชะออกจากชั้นกรอง PAC ถูกจำกัดด้วย Head loss
Slurry contactor preceding rapid mix	การผสมกันดีเยี่ยม ไม่เกิดการรบกวนจากการตกตะกอน	อาจจะต้องคิดตั้งอ่างและตัวผสม

2.8 การวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS)

เครื่อง AAS เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายไอออน หลักการคือเมื่อสารละลายตัวอย่างถูกส่งผ่านสู่เปลวไฟเพื่อให้เกิดการแตกตัว โดยไอออนของโลหะหนักจะแตกตัวอยู่ในรูปของออกไซด์หรืออะตอมเสรีของธาตุ โดยปรากฏการณ์นี้จะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นสู่สถานะกระตุ้น โดยอาศัยการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะเจาะจงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ เทคนิคที่ใช้มีหลายเทคนิคด้วยกันดังนี้

1. Flame atomization technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ

2. Flameless technique/ non flame atomization technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า โดยสามารถกำหนดคุณสมบัติของการเผาไหม้ค่าต่างกันได้เวลาที่ต่างกัน

3. Hydride generation technique กรณีที่สารตัวอย่างแตกตัวด้วยวิธีที่ 1 และ 2 ไม่ได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการแตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของออกซิเจนของธาตุเหล่านี้จึงต้องทำให้ธาตุเหล่านี้กลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากไฮโดรเจนทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้ ใช้เทคนิคนี้กับโลหะหนัก เช่น As, Se, Te, Ge, Bi และ Sb

4. Cold vapor generation technique ใช้วิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่าย ซึ่งได้แก่การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อย

องค์ประกอบของเครื่อง AAS

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source)
2. ส่วนที่ทำให้เป็นอะตอมเสรี (Atomizer)
3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromater)
4. ดีเทกเตอร์ (Detector)
5. เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and read-out units)

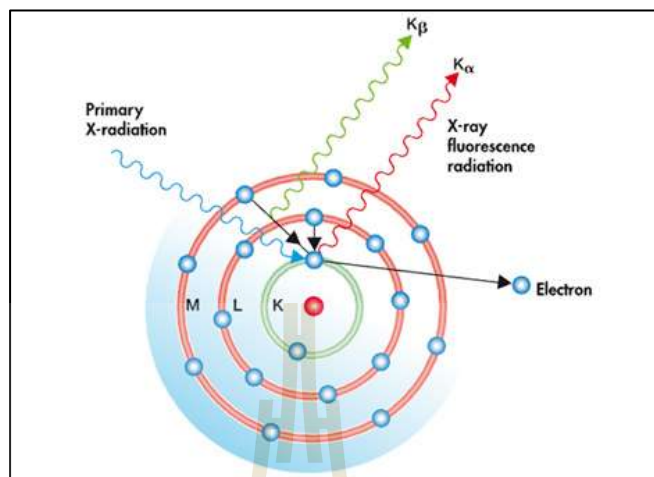
กระบวนการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Nebulization เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็กๆ ด้วยเครื่อง Nebulizer
2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆ ของสารละลายรวมตัวกันเป็นหยดไม่สามารถลอยในอากาศได้ จึงตกลงมา
3. Mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆ ของสารละลายเกิดผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิไดซ์ใน Spray chamber ของ Nebulizer
4. Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองเล็กถูกกำจัดทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นตอนล่างของเปลวไฟ
5. Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟจากพลังงานความร้อน

2.9 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยแสงซินโครตรอน

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescense: XRF) ด้วยแสงซินโครตรอน เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับศึกษาชนิดขององค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง โดยใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงกระตุ้นให้อิเล็กตรอนชั้นในสุดของธาตุหลุดออก (พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้กระตุ้นต้องสามารถเอาชนะค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในของธาตุ) เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นหลุดออก อะตอมของธาตุจะพยายามกลับสู่สถานะปกติ ซึ่งจะเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอน

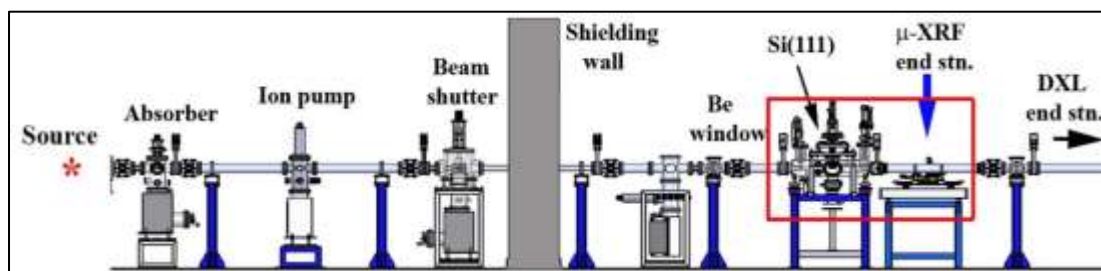
ที่หลุดออกด้วยอิเล็กตรอนชั้นนอก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 X-ray fluorescence (Helmut Fischer, ม.ป.ป.)

โดยการเรืองรังสีเอกซ์ของธาตุแต่ละชนิด จะมีค่าพลังงานเฉพาะตัว (Characteristic X-ray) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออก และพลังงานของชั้นอิเล็กตรอนที่ลงมาแทนที่ (K, L, M, ...shell) ของธาตุนั้นๆ สามารถบ่งบอกได้ว่าอิเล็กตรอนดังกล่าวเคลื่อนที่มาจากระดับชั้นของอิเล็กตรอน (Shell) ใด เช่น $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ และ $K\beta_1$ ดังนั้นการวัดค่าพลังงานของการเรืองรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จึงสามารถบอกชนิดของธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวอย่างได้ รังสีเอกซ์ที่ผลิตจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งงานวิจัยได้ใช้เทคนิค Micro-X-ray Fluorescence (Micro XRF) spectroscopy ณ ระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลองที่ 6b สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในการวิเคราะห์หาธาตุกัมมันตรังสีและโครเมียมในตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ผ่านการดูดซับแล้ว ระบบลำเลียงแสง BL6 มีส่วนประกอบดังนี้คือ (ภาพที่ 2.17)

1. Absorber และ beam shutter ทำหน้าที่เปิดปิดเพื่อให้แสงซินโครตรอนผ่านไปยังสถานีทดลอง
2. Shielding wall เป็นกำแพงกันรังสี ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รังสีแกมมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนออกมาภายนอกบริเวณโถงทดลอง
3. Beryllium window เป็นตัวกรองแสงซินโครตรอน โดยจะให้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ผ่านเท่านั้น

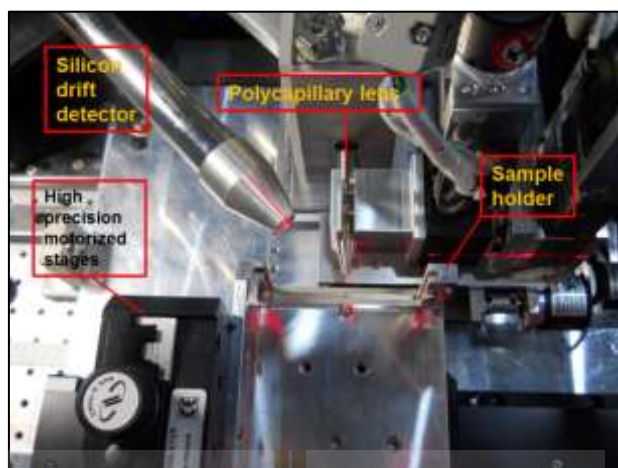


ภาพที่ 2.17 ส่วนประกอบของระบบลำแสงรังสีเอกซ์ที่ 6

ระบบลำแสงรังสีเอกซ์ที่ 6 เป็นระบบลำแสงซินโครตรอนในย่านพลังงานรังสีเอกซ์ สำหรับใช้งานในระบบสถานีทดลองจำนวน 2 ระบบ ประกอบด้วยสถานีทดลองที่ BL6a Deep X-ray lithography (DXL) และสถานีทดลองที่ BL6b Micro X-ray Fluorescence (Micro XRF) เนื่องจากงานวิจัยได้ทำการศึกษาเฉพาะระบบสถานีทดลอง BL6b โดยส่วนประกอบของระบบสถานีทดลอง Micro XRF มีรายละเอียดดังนี้

สถานีทดลอง Micro XRF ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 4 ส่วน (ภาพที่ 2.18) ประกอบด้วย

1. เลนส์สำหรับโฟกัสรังสีเอกซ์ชนิด Polycapillary lens ติดตั้งอยู่บนระบบ Alignment stage เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูงในการปรับรูปร่างและขนาดของลำแสงของรังสีเอกซ์ที่ผ่านเลนส์ลงบนตัวอย่าง โดยระบบ Polycapillary lens ของสถานี 6b สามารถโฟกัสลำแสงให้มีขนาด $30\ \mu\text{m}$
2. กล้องไมโครสโคป (CCD microscope) สำหรับการตรวจสอบและการเลือกบริเวณของตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ โดยผู้ทดลองสามารถบันทึกภาพถ่ายของตัวอย่างก่อนและหลังการวัด
3. ระบบจับยึดตัวอย่าง (Sample stage) ซึ่งจะถูกระบายความร้อนด้วยระบบมอเตอร์ที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง โดยตัวอย่างจะถูกวางในแนวตั้งฉากกับลำแสง ระบบ Stage นี้สามารถเลื่อนตัวอย่างในแนวซ้ายขวาและขึ้นลง เพื่อใช้ในการศึกษาการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างในบริเวณที่ต้องการศึกษา
4. ระบบหัววัดรังสี ณ สถานีทดลอง BL6b จะใช้หัววัดชนิด Si(drift) detector ซึ่งมีค่า Energy resolution ที่ $160\ \text{eV}$ ณ ตำแหน่ง Mn-K α line



ภาพที่ 2.18 สถานีทดลอง Micro X-ray

จากงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวิเคราะห์ธาตุ निकิลและ โครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ดังนั้นจึงศึกษาสเปกตรัมของธาตุ निकิลและ โครเมียม ซึ่งจะเกิดการเรืองรังสีเอกซ์ที่ค่าพลังงานดังตารางที่ 2.15 รูปแบบสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีธาตุทั้งสองชนิดจะปรากฏฟีกขึ้นที่ค่าพลังงานดังตารางที่กล่าวข้างต้น (แนวแกน X) ส่วนความสูงของฟีก (แกน Y) จะแสดงถึงจำนวนของสัญญาณ X-ray Fluorescence counts จากธาตุองค์ประกอบที่มีบนตัวอย่าง ซึ่งมีแนวโน้มให้เห็นถึงปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 2.15 ค่าพลังงานที่ถูกปลดปล่อย (Dziunikowski, 1989)

ธาตุ	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$
นิกเกิล (Ni, 28)	7,478.15	7,460.89	8,264.66
โครเมียม (Cr, 24)	5,414.72	5,405.509	5,946.71

2.10 การนำโลหะหนักกลับคืน (Recovery)

เนื่องจากการกำจัดของเสียอันตรายกลายเป็นประเด็นสำคัญที่อุตสาหกรรมต้องคำนึงถึง (Akcil et al., 2015) หรือแม้แต่ของเสียที่เกิดจากขยะมูลฝอยล้วนแต่เป็นอันตรายเนื่องจากมีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณสูงและวิธีการกำจัดของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักก็มีหลายวิธี แต่หากนำไปฝังกลบอาจส่งผลให้ดินและน้ำใต้ดินเกิดการปนเปื้อนโลหะหนัก ดังนั้นการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ด้วยการใช้สารเคมีหรือจุลินทรีย์ในกระบวนการดังกล่าว ซึ่งมีข้อดีข้อเสียต่างกัน (ตารางที่ 2.16) พบว่าวิธีการใช้สารเคมีมีความเหมาะสมเนื่องจากกระบวนการใช้ระยะเวลาสั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารเคมีในการนำโลหะหนักกลับคืน

ตารางที่ 2.16 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการนำโลหะหนักกลับคืน (Akcil et al., 2015)

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
Chemical leaching, Thermal treatment, Other traditional process for metal extraction	กระบวนการใช้เวลาสั้น	ใช้พลังงานสูงเกิดของเสียอันตราย
Bioleaching (Bacterial and fungal leaching)	เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	การดำเนินการนาน

วิธีการนำโลหะหนักกลับคืนจากของเสียหรือกากของเสียใช้สารเคมีต่างกัน (ตารางที่ 2.17) พบมีการใช้กรด เช่น กรดไนตริก (HNO_3), ไฮโดรคลอริก (HCl), กรดฟอร์มิก (HCOOH), กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ต่างที่ใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นต้น ในการนำโลหะหนักกลับคืน (Lata, Singh, and Samadder, 2015; Bansal et al., 2005) ทั้งนี้กรดไนตริกมีความเหมาะสมในการเป็นสารสกัดมากกว่า เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการนำนิกเกิลและโครเมียมออกจากถ่านกัมมันต์ได้ร้อยละ 98 และ 70 ตามลำดับ (Gupta et al., 2012; Sarkar, 2002)

ตารางที่ 2.17 สารเคมีหรือสารสกัดที่ใช้ในการนำโลหะหนักกลับคืน (Akcil et al., 2015)

สารสกัด	โลหะหนักที่ถูกนำกลับคืน (%wt)	
	Ni	Cr
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$	65	N.D.
10% NaOH, pH 8.8	20	N.D.
10% NaOH, pH 8.4	10	N.D.
NaOH (1st stage) H_2SO_4 (2 nd stage)	98	N.D.
NaOH (1st stage) H_2SO_4 (2 nd stage)	92	N.D.
NaOH roasting (1st stage) H_2SO_4 leaching (2 nd stage)	98.2	N.D.
KHSO_4 fusion + water extraction	90	N.D.
Aqueous $\text{NH}_3 + \text{NH}_4\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$	80	N.D.
Citric acid	85	N.D.
Oxalic acid + H_2O	65	N.D.
0.01 N NaOH, NaHCO_3 , Na_2CO_3	N.D.	111-115
0.1 M HNO_3 and EDTA	N.D.	80
NaOH and BaCl_2	N.D.	99.9-100

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง วิเคราะห์ไม่พบ

2.11 การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ (Regeneration)

การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ เป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์และลดของเสียที่มีการปนเปื้อนสารมลพิษหรือโลหะหนัก การฟื้นฟูสภาพแบ่งเป็น 3 วิธีดังนี้

1. วิธีทางเคมี คือนำสารเคมีมาผสมกับถ่านกัมมันต์ที่มีการปนเปื้อน สารปนเปื้อนจะถูกออกซิไดซ์ออกจากถ่านกัมมันต์ สารเคมีที่ใช้ เช่น NaOH, NaOCl, H₂O₂ และ HCl

2. วิธีความร้อน คือ วิธีนี้มี 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ การระเหยไอน้ำที่ใกล้ 100 องศาเซลเซียส อบคาร์บอนที่หมดสภาพ ณ อุณหภูมิถึง 800 องศาเซลเซียส และการกระตุ้นการนำเข้าที่อุณหภูมิระหว่าง 800-950 องศาเซลเซียส

3. วิธีเผา คือใช้เตาเผาแบบ Multiple heat furnace โดยใช้แก๊สร้อน เพื่อเป็นตัวออกซิไดซ์ในการกระตุ้น เนื่องจากการเผาจะทำให้คาร์บอนของตัวดูดซับลดลงจึงจำเป็นต้องมีการกระตุ้น

2.12 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม

เนื่องจากปัจจุบันน้ำทิ้งที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม พบว่าจำเป็นต้องมีค่าดัชนีคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสม ซึ่งถูกกำหนดค่าตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5.5-9.0	เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH meter) ที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 0.1 หน่วย
2. อุณหภูมิ (temperature)	ไม่เกิน 40 °C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
3. สี (color)	300 เอซีเอ็มไอ	วิธีเอซีเอ็มไอ (ADMI method)

ตารางที่ 2.18 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
4. ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved solids หรือ TDS)	(1) กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (2) กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยตัวอย่างที่กรองผ่านตัวอย่างกรองใยแก้ว (glass fiber disk) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
5. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter disk) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
6. บีโอดี (biochemical oxygen demand)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกันและหาค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยวิธีไอโซต์โมดิฟิเคชัน (azide modification) หรือวิธีเมมเบรนอิเล็กโทรด (membrane electrode)
7. ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร	ย่อยสลายโดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate)
8. ซัลไฟด์ (sulfide)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไอโอดิเมตริก (iodometric method) หรือวิธีเมทิลีนบลู (methylene blue method)
9. ไซยาไนด์ (cyanide)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่น (distillation) และตรวจวัดด้วยวิธีเทียบสี (colorimetric method) หรือวิธี flow injection analysis
10. น้ำมันและไขมัน (fat oil and grease)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยเทคนิค liquid-liquid extraction หรือ soxhlet extraction ด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
11. ฟอรัมาลดีไฮด์ (formaldehyde)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	วิธีเทียบสี (colorimetric method)
12. สารประกอบฟีนอล (phenol)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่น (distillation) และตรวจวัดด้วยวิธีเทียบสี (colorimetric method)
13. คลอรีนอิสระ (free chlorine)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไตเตรท (titrimetric method) หรือวิธีเทียบสี (colorimetric method)
14. สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (pesticide)	ต้องตรวจไม่พบ	ก๊าซโครมาโตกราฟี (gas-chromatographic method)
15. ทีเคเอ็น (total kjedahl nitrogen)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	เจลดาคัลด์ (kjeldahl)

ตารางที่ 2.18 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16. โลหะหนัก		
(1) สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (acid digestion) และวัดหาปริมาณโลหะด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry: AAS) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(2) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	เทียบสี (colorimetric method) หรือวิธีสกัดและตรวจวัดด้วยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry: AAS) หรือวิธีสกัดและตรวจวัดด้วยวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(3) โครเมียมไตรวาเลนต์ (trivalent chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร	คำนวณจากค่าส่วนต่างของโครเมียม ทั้งหมดกับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์
(4) สารหนู (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (atomic absorption spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์เจเนอเรชัน (hydride generation) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(5) ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (acid digestion) และวัดปริมาณโลหะด้วยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry: AAS) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(6)ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	โคลด์วาเปอร์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (cold vapor atomic absorption spectrometry) หรือวิธีโคลด์วาเปอร์อะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรเมตรี (cold vapor atomic fluorescence spectrometry) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(7) แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร	ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (acid digestion) และวัดปริมาณโลหะด้วยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry: AAS) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(8) แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (acid digestion) และวัดปริมาณโลหะด้วยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry: AAS) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(9) ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry) ชนิดไฮไดรด์เจเนอเรชัน (hydride generation) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)
(10) ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (acid digestion) และวัดปริมาณโลหะด้วยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry: AAS) หรือวิธีอินดักทีฟพลาสมา (inductively coupled plasma)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของรถยนต์ ศึกษาการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืน และการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ซ้ำ รวมถึงศึกษาการใช้คาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสของรถยนต์มาทำถ่านกัมมันต์ในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเกจคอลัมน์แบบคู่ (Dual packed bed column) โดยทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมก่อนและหลังการดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลและโครเมียม ซึ่งมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น
1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic absorption spectroscopy: AAS)	Analytik jena/nova AA
2. เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (Brunauer, Emmett and teller: BET)	Bel-Japan/Bel sorp mini 11
3. เครื่องกวนผสม (Shaker)	New Brunswick scientific/ Ecella E5 platform shaker
4. เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer)	Heidolph/MR Hei. Standard
5. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace)	CARBOLITE/ Control 201
6. ตู้ดูดควัน (Hood)	FLEXLAB/HF9-04
7. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (Multi parameter analyzer)	Consort/C562

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น
8. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter)	HACH/2100Q
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM)	Carl Zeiss/AURIGA
10. ตู้อบแห้ง (Hot air oven)	Memmert/UE500
11. ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)	WEIFO/VERSION
12. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) 2 ตำแหน่ง	Precisa/XT1200C
13. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) 4 ตำแหน่ง	Sartorius/NSC-TISI-TIS 17025
14. เครื่องควบคุมอัตราการไหลของของเหลว (Peristaltic pump)	ATTO/C-2110

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาวิจัย (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมี	สูตรโมเลกุล	ยี่ห้อ/ประเทศผู้ผลิต
1. กรดไนตริก (Nitric acid)	HNO_3	Ajax Finechem/ Australia
2. สารละลายมาตรฐานนิกเกิล (Nickel standard solution)	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$	Merck KGaA/Germany
3. สารละลายมาตรฐานโครเมียม (Chromium standard solution)	$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$	Merck KGaA/Germany
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	H_2O_2	Chem-supply/Australia
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)	HCl	Merck KGaA/Germany
6. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid)	H_2SO_4	Merck KGaA/Germany
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	NaOH	Carlo Erba Reagent/ Italy
8. ไอโอดีน (Iodine)	I_2	Carlo Erba Reagent/ Italy
9. โซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	Carlo Erba Reagent/ Italy
10. ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)	N_2	-
11. ไฮดราซีนซัลเฟต (Hydrazine sulfate)	$\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$	Carlo Erba Reagent/ Italy
12. เฮกซามทิลินเตตรามีน (Hexamethylene tetramine)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_6$	Riedel-de-Haen/ Germany

3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์

วัสดุที่ใช้เตรียมทำถ่านกัมมันต์คือ คาร์บอนแบล็คที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของรถยนต์ จากอุตสาหกรรมผลิตปิโตรเลียมด้วยกระบวนการไพโรไลซิสของรถยนต์ ขั้นตอนการเตรียม มีดังนี้

3.2.1 นำคาร์บอนแบล็คมาคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาดน้อยกว่า 300 ไมโครเมตร

3.2.2 นำไปล้างด้วย 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีอัตราส่วน 1 กรัม ของคาร์บอนแบล็ค ต่อ 10 มิลลิลิตรของ 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการล้างบนเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดกับ คาร์บอนแบล็คออก เช่น น้ำมัน สารทาร์ เป็นต้น

3.2.3 ทิ้งให้เย็นแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้สาร 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ออกจาก คาร์บอนแบล็ค

3.2.4 นำมารองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร เพื่อแยก คาร์บอนแบล็คออกจากน้ำกลั่น

3.2.5 นำคาร์บอนแบล็คไปอบให้แห้งในตู้อบ (Hot air oven)

3.2.6 นำคาร์บอนแบล็คใส่ถาดกันความร้อนไปกระตุ้นทางกายภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.7 รอให้ถ่านเย็นลงแล้วเก็บใส่ตู้ดูดความชื้น (Desiccator) จากนั้นล้างด้วย 1 โมลาร์ กรด ไฮโดรคลอริก เพื่อกำจัดเถ้า

3.2.8 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อชะกรดไฮโดรคลอริกออก และนำถ่านกัมมันต์อบให้แห้งใน ตู้อบ (Hot air oven) จากนั้นสามารถนำถ่านกัมมันต์ไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3.3 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

ศึกษาคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ สัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ ด้วยการใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM)

และลักษณะพื้นผิว (Texture) เพื่อศึกษาขนาดพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (Brunauer, Emmett and teller: BET) คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ศึกษาด้วยวิธีการดูดซับไอ ไอโอดีน (Iodine number) และความหนาแน่นปรากฏ (Density appears) เพื่อทราบถึงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์, 2547) โดยมีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

3.3.1.1 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ศึกษาด้วยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) ด้วยการนำตัวอย่างคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ที่แห้งแล้วนำไปติดบนแท่นวางตัวอย่าง (SEM stub) โดยใช้ Double slide carbon tape ในการเชื่อมติดตัวอย่างกับแท่นวาง ใช้ลมเป่าเพื่อกำจัดตัวอย่างส่วนเกิน จากนั้นทำตัวอย่างให้แห้ง (Drying) ด้วยเทคนิคการทำให้ตัวอย่างแห้ง ณ จุดวิกฤต (Critical point drying) โดยนำเข้าเครื่อง Critical point dryer ซึ่งให้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเข้าไปแทนที่สารอินทรีย์ที่ใช้ดึงน้ำออกจากตัวอย่างจนกระทั่งแทนที่อย่างสมบูรณ์ จึงทำให้อุณหภูมิต่ำและความดันภายในช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber) เพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ 31.1°C และความดัน $1,073\text{ psi}$ เมื่อถึงจุดนี้ของเหลวและแก๊สจะมีความหนาแน่นเท่ากันทำให้กลายเป็นไอ จึงได้ตัวอย่างที่แห้งและคงลักษณะรูปร่าง จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ค่าความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) 10-15 กิโลโวลต์ (kV) รวมถึงวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectrometry (EDX) ที่เชื่อมต่อกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) (ภาพที่ 3.1) โดยใช้ศักย์เร่งอิเล็กตรอน 0.5-30 กิโลโวลต์ (kV) สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุได้ตั้งแต่ธาตุลิเทียม (Li) ไปจนถึงธาตุยูเรเนียม (U)



ภาพที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

3.3.1.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิว (Texture) ศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (Brunauer, Emmett and Teller: BET) เพื่อทราบถึงขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของคาร์บอนแบล็กและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ก่อนและหลังกระตุ้น (ภาพที่ 3.2) ซึ่งผลการวิเคราะห์ถูกแสดงเป็นกราฟ BET-plot ผลที่แสดงมีค่าความสัมพันธ์ของความดันในช่วง 0.05-0.35 โดยถือว่าเป็นช่วงที่แสดงผลได้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ (Bansal et al., 2005) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนการไล่แก๊สออกจากพื้นผิว (Degases) คือชั่งน้ำหนักหลอดสำหรับใส่ตัวอย่างแล้วบันทึกค่าน้ำหนัก จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่าง (น้ำหนักไม่เกิน 0.2 กรัม) นำตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักแล้วเทลงหลอดตัวอย่างโดยใช้กรวยและหลอดพลาสติกเพื่อป้องกันตัวอย่างติดข้างหลอด และนำหลอดตัวอย่างใส่เครื่อง Degasses เพื่อทำการไล่อากาศ ใช้เวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (Karmacharya et al., 2016) ใส่ในช่องวางตัวอย่าง กด Heat แล้วตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเรียบร้อยแล้วกด SEL และกดปุ่ม PORT-1, PORT-2 และ PORT-3 แล้วกด VAC รอจนครบเวลาแล้วกดปิดปุ่ม PORT-1, PORT-2 และ PORT-3 แล้วกด PURGE เพื่อรอให้ตัวอย่างเย็น (15-20 นาที)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. เปิดคอมพิวเตอร์และเปิดเครื่อง BET ด้านหลัง จากนั้นเปิดโปรแกรม BELSORP-mini เปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที

2. เมื่อเปิดโปรแกรมแล้วกดเลือกที่ use DVD file เลือก Local disk C เลือก BEL JAPAN เลือก BELSORP เลือก JKN เลือกไฟล์ กด open

3. ทำการตั้งชื่อที่คำว่า operator ในหน้าโปรแกรม เลือก PORT-1, PORT-2 และ PORT-3 คำว่า select ให้เลือกไฟล์แล้วตั้งชื่อไว้ คำว่า sample ให้ตั้งชื่อ คำว่า comment ให้ใส่รายละเอียด เช่น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ คำว่า sample weight ให้ใส่ค่าน้ำหนักตัวอย่างโดยได้จากการนำน้ำหนักหลอดตัวอย่างเปล่าลบกับหลอดตัวอย่างที่มีตัวอย่างหลังการ degasses แล้วลบกัน

4. เลือกกด save parameter setting ตั้งชื่อแล้วกด save

5. เทไนโตรเจนเหลวใส่บีกเกอร์สแตนเลสแล้วเทใส่ช่องรับของเครื่อง BET (สามารถวิเคราะห์ได้ ประมาณ 30 ชั่วโมง จากนั้นเอาแผ่นโพลีเอทิลีนปิดช่องรับไนโตรเจนเหลวไว้

6. นำหลอดตัวอย่างใส่เข้าเครื่อง BET ตามตำแหน่งที่กำหนด กดปุ่ม start measurement กด yes กด ok รอจนความดันในหลอดตัวอย่างลดเหลือศูนย์กิโลปาสการ์ (kPa) เพื่อให้ไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่อยู่บนผิวของตัวอย่างจนเต็มพื้นที่ รอประมาณ 30-60 นาที จากนั้นเครื่องจะทำการวิเคราะห์ผลเป็นค่าขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน



ภาพที่ 3.2 เครื่อง BET

3.3.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

3.3.2.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

ดำเนินการศึกษาสองวิธีด้วยกัน ดังนี้

1. ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number)

การศึกษานี้ใช้อธิบายความสามารถของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ในการดูดซับ สารละลายไอโอดีน ซึ่งสามารถอธิบายความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์จาก ยางรถยนต์ได้เช่นกัน โดยบ่งบอกถึงรูพรุนที่มีขนาดเล็ก ทำการศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 โดยมีขั้นตอนดังนี้ (Baccar et al., 2009)

1.1 นำถ่านกัมมันต์อบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.2 ทำการชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัม แล้วใส่ขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายกรดไฮโดร คลอริกความเข้มข้น 5% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดแก้ว

1.3 เติมสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล (ภาคผนวก ข.) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วผสมให้ตัวอย่างเข้ากัน 30 วินาที จากนั้นกรองแยกถ่านกัมมันต์ออกจาก สารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร

1.4 ปิดสารละลายที่กรองมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล (ภาคผนวก ข.) จน สารละลายเป็นสีเหลือง จากนั้นเติมน้ำแข็ง 2-3 หยด จะพบว่าสารละลายเป็นสีน้ำเงินและไทเทรตต่อ จนสารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตร และคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{X}{M} \text{ (มก./ก.)} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (1)$$

$$DF = \frac{\text{ปริมาตร ไอโอดีนเริ่มต้น} + \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตร ไอโอดีนที่เหลือ}} \quad (2)$$

X คือ ปริมาณ ไอโอดีน (มิลลิกรัม)

A คือ 12693N₂

B คือ 126.93N₁

DF คือ ค่าแฟคเตอร์การเจือจาง

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

M คือ น้ำหนักถ่าน (กรัม)

N₁ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (นอร์มอล)

N₂ คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)

2. การศึกษาความหนาแน่นปรากฏ (Density appears)

การศึกษาคูณลักษณะของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ เพื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาศึกษา ก่อนและหลังกระตุ้น (Baccar et al., 2009) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์บรรจุลงกระบอกตวงให้มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

2. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงกระบอกตวงที่บรรจุคาร์บอนแบล็ค และถ่านกัมมันต์ จากนั้นบันทึกปริมาตรที่อ่านได้จากกระบอกตวง โดยค่าระดับน้ำที่สูงขึ้นจากระดับของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในกระบอกตวง เทียบกับค่าน้ำหนักของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ก่อนการแทนที่ด้วยน้ำ เป็นค่าปริมาตรปรากฏ

3. นำค่าปริมาตรรูพรุนของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET โดยใช้วิธีการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (77 เคลวิน) ค่าปริมาตรรูพรุนของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์คือ 0.54 และ 1.05 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณ ดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_p = 1 - \left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right) \quad (3)$$

$$\rho_s = \left(\frac{\rho_p}{1 - \varepsilon_p}\right), \quad (4)$$

$$\left(\frac{\rho_p}{1 - \varepsilon_p}\right) = \left(\frac{W_s}{V_{app}}\right), \quad \rho_p = \frac{W_s}{V_{app}} \quad (5)$$

ε_p คือความพรุนของอนุภาค

ρ_p คือความหนาแน่นปรากฏของอนุภาค (ก./ลบ.ซม.)

ρ_s คือความหนาแน่นจริงของอนุภาค (ก./ลบ.ซม.)

V_{app} คือปริมาตรปรากฏของอนุภาค (ลบ.ซม.)

W_s คือน้ำหนักของอนุภาค (ก)

3.4 การดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

3.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

การดูดซับนิกเกิลและโครเมียมทำการทดสอบโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมอย่างละ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการศึกษาด้วยพารามิเตอร์ดังนี้คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสีย และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร และใส่ถ่านกัมมันต์ ในปริมาณที่ต่างกันคือ 3, 5 และ 10 กรัม

2. ปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ที่แตกต่างกันคือ 2, 4 และ 5 ปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้นนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสต่างกันดังนี้ คือ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที (Mousavi et al., 2010)

3. นำตัวอย่างกรองแยกผ่านกระดาษกรอง จากนั้นนำน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ไปย่อยเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยวิธี Nitric acid digestion (ภาคผนวก ข.) โดยเติมกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ลูกแก้ว (Glass bead) 2-3 เม็ด และย่อยบน Hot plate ให้ตัวอย่างค่อยๆ เคี้ยวจนสารละลายเหลือประมาณ 10-20 มิลลิลิตร

4. จากนั้นปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นและนำไปวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค Flame atomization technique โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic absorption spectroscopy: AAS) (Gupta et al., 2012a; 2013b) ซึ่งผลจากการศึกษาทำให้ทราบปริมาณถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสีย และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียม เพื่อนำค่าสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในลำดับต่อไป

3.4.2 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ ได้แก่ แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่แปรผันความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมต่างกัน คือ 5, 10, 30, 50, 100, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 โดยใส่ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม และระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที บนเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 150 rpm ซึ่งปริมาณถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดต่างและระยะเวลาในการสัมผัสที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นค่าที่เหมาะสมในการดูดซับที่ได้จากการศึกษาสภาวะในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.4 โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์หนักเกิดและโครเมียมที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 5, 10, 30, 50, 100, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ (1 M H₂SO₄) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ (1 M NaOH)

2. เทตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ในแต่ละความเข้มข้น จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม เท่ากันทุกความเข้มข้น ปิดจุกแล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 150 rpm (24.5 องศาเซลเซียส)

3. จากนั้นกรองแยกถ่านกัมมันต์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์และนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่กรองแยกแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณของหนักเกิดและโครเมียมด้วยเครื่อง AAS จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับข้างต้น ประกอบด้วยสองชนิดคือ แลงเมียร์ไอโซเทอร์มและฟรุนดิชไอโซเทอร์ม เพื่อให้ทราบถึงการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ว่ามีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มชนิดใด หากมีความสัมพันธ์กับแลงเมียร์ไอโซเทอร์มดังนั้นการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว แต่หากมีความสัมพันธ์กับฟรุนดิชไอโซเทอร์มการดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น

3.5 การศึกษาการดูดซับหนักเกิดและโครเมียมในน้ำเสียชุมชน

ในการศึกษามีกระบวนการดังนี้

3.5.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของหนักเกิดและโครเมียม

ก่อนการนำน้ำเสียชุมชนมาศึกษา จำเป็นต้องทราบค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของหนักเกิดและโครเมียม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic absorption spectroscopy: AAS) โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Stock standard solution) ของหนักเกิดและโครเมียม ที่มีความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วย 1% กรดไนตริก
2. จากนั้นทำการย่อยตัวอย่างน้ำเสียชุมชนด้วยวิธี Nitric acid digestion (ภาคผนวก ข.)
3. นำตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อทราบความเข้มข้นของหนักเกิดและโครเมียม

3.5.2 การศึกษาการดูดซับหนักเกิดและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

ดำเนินการศึกษาด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ในการดูดซับหนักเกิดและโครเมียมจากน้ำเสียชุมชน โดยน้ำเสียชุมชนจะถูกรับให้มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 5 ปริมาณถ่านกัม

มันต์ที่ใช้คือ 3 กรัม ระยะเวลาในการสัมผัสคือ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที ทำการศึกษาเพื่อทราบประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียชุมชนโลหะของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ชั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำเสียชุมชนโลหะที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสต่างกันดังนี้คือ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที (Mousavi et al., 2010)

3. จากนั้นนำมากรองแยกผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 และทำการย่อยตัวอย่างน้ำเสียชุมชนโลหะด้วยวิธี Nitric acid digestion (ภาคผนวก ข.)

4. ปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปวิเคราะห์กับเครื่อง AAS ด้วยเทคนิค Flame atomization technique (Gupta et al., 2012, 2013) และศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับ จำนวนได้ดังสมการที่ 6 และ 7

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัด (\% Removal efficiency)} = \frac{(C_0 - C_i) \times 100}{C_0} \quad (6)$$

การศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดซับ จำนวน ดังสมการต่อไปนี้ ปริมาณโลหะหนัก

$$\text{ที่ถูกดูดซับ (mg/g)} = \frac{(C_0 - C_i) \times V}{W} \quad (7)$$

C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_i คือความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

V คือปริมาตรของน้ำเสียชุมชนโลหะ (ลิตร)

W คือปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)

การศึกษานี้ทำให้ทราบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนโลหะ และนำข้อมูลที่ได้ไปประกอบการศึกษาการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพคเบดคอลัมน์แบบคู่ต่อไป

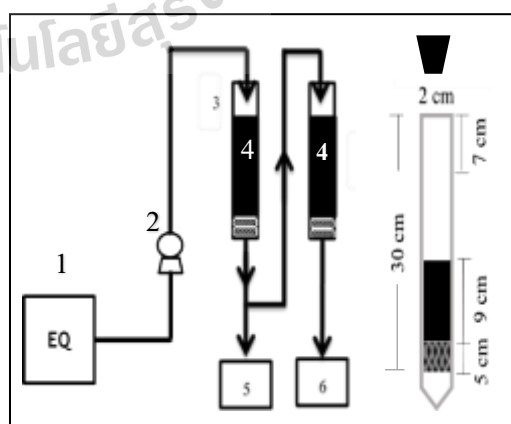
3.5.3 การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพคเบดคอลัมน์แบบคู่

การศึกษาศักยภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนโลหะ ด้วยระบบแพคเบดคอลัมน์แบบคู่ (ภาพที่ 3.3) โดยการเดินระบบเริ่มจากการป้อนน้ำเสียชุมชนโลหะที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที (ตารางที่ 3.3) เข้าสู่คอลัมน์ที่ 1

คอลัมน์ทำจากแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร ภายในคอลัมน์ประกอบด้วยชั้นรับถ่านกัมมันต์และชั้นของตัวดูดซับ โดยบรรจุชั้นของถ่านกัมมันต์ 9 เซนติเมตร คิดเป็นร้อยละ 50 ของคอลัมน์ที่เหลือ (Gupta et al., 2012) โดยด้านบนของคอลัมน์เหลือพื้นที่ไว้สำหรับรองรับน้ำเข้าระบบ 7 เซนติเมตร (ตารางที่ 3.3) ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 สัปดาห์ หรือจนกระทั่งระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเข้าสู่สภาวะสมดุล เมื่อน้ำเสียขุ่นไหลถูกจ่ายเข้าระบบและผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์แรกแล้ว จะถูกนำไปผ่านการดูดซับในคอลัมน์ที่สอง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากระบบในคอลัมน์แรกและคอลัมน์ที่สองที่ผ่านการดูดซับแล้วที่เวลา 0, 4, 8, 16, 24, 40, 56, 72, 96, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง (Zulfadhly et al., 2001; Gupta et al., 2012) ด้วยขวดเก็บตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมด้วยเครื่อง AAS โดยเทคนิค Flame atomization technique น้ำเสียขุ่นไหลที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเพื่อกเบดคอลัมน์แบบคู่แล้วนำไปศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีคือ ค่าสี ค่าความขุ่น และค่าความเป็นกรดต่างก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ในการทดลองการดูดซับนิกเกิลและโครเมียม

การทดลอง	พารามิเตอร์				
	ความสูงของคอลัมน์ (ซม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (ซม.)	อัตราการไหล (มล./นาที)	ความสูงของตัวกลาง (ซม.)	ระยะเวลาพักเก็บ (นาที)
1	30	2	1.5	9	19
2	30	2	1.0	9	28
3	30	2	0.5	9	57



ภาพที่ 3.3 ระบบเพื่อกเบดคอลัมน์แบบคู่ (1:ถังเก็บน้ำเสีย, 2: peristaltic pump, 3: คอลัมน์, 4: ถ่านกัมมันต์, 5 และ 6: จุดเก็บตัวอย่าง)

จากการศึกษาทำให้ทราบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในช่วงเวลาใดมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลอย่างไร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกักเก็บ คำนวณดังสมการต่อไปนี้ (Metcalf et al., 2004)

$$EBRT = \frac{V}{Q} (8)$$

$$V = \pi r^2 h (9)$$

EBRT คือระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสียในระบบ (นาทีก)

V คือปริมาตรน้ำเสียที่เข้าระบบ (ลบ.ชม.)

Q คืออัตราการไหลของน้ำเสีย (มล./นาทีก)

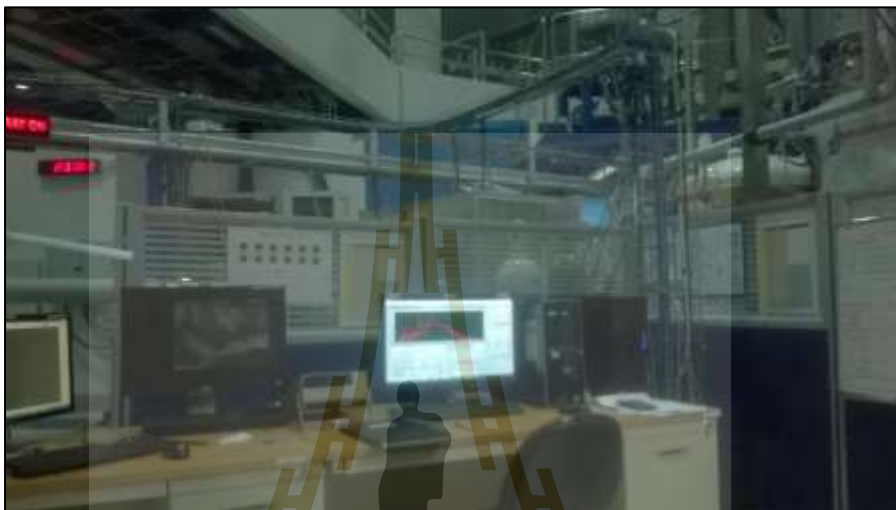
h คือความสูงของตัวดูดซับ (ชม.)

3.5.4 การศึกษาหาองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ด้วยแสงซินโครตรอน

การศึกษานี้ของธาตุองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุนิกเกิลและโครเมียมที่อาจมีอยู่ในถ่านกัมมันต์ เพื่อยืนยันว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีความสามารถในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมจากน้ำเสียชุมชนได้หรือไม่ จึงดำเนินการโดยใช้แสงซินโครตรอนในการวัดค่าพลังงานที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถบอกชนิดของธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่างได้ ด้วยการใช้การเรืองรังสีเอกซ์ ที่สถานี BL6b (ภาพที่ 3.4) โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. นำแผ่นโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ติดลงบนช่องติดตัวอย่าง (Sample holder) ด้านที่เป็นกาวเหนียว
2. นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ต้องการวิเคราะห์ ใส่ลงในช่องว่างของช่องติดตัวอย่าง (Sample holder) ใต้อีกแผ่นโพลีโพรไพลีน
3. นำแผ่นโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ติดทับแล้วกดให้แน่น เพื่อป้องกันการหลุดออกของตัวอย่าง
4. นำแผ่นช่องติดตัวอย่าง (Sample holder) ที่ติดตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ติดลงบนแผ่นติดตัวอย่าง ติดด้านเรียบของแผ่น
5. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ใน Chamber โดยหันด้านเรียบเข้าหาแสง ปิด Chamber
6. ป้อนให้ภายใน Chamber เป็นสุญญากาศ
7. เปิดแก๊สฮีเลียมเข้า Chamber ให้เต็ม

8. กำหนดตำแหน่งของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์
9. ทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง
10. ประมวลผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม (PyMca Fresh Start หรือ ROI imaging Tool) แสดงผลเป็นกราฟหรือพื้นที่



ภาพที่ 3.4 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยแสงซินโครตรอน

3.6 การศึกษาสารสกัดที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืน

เป็นการศึกษาเพื่อทราบสารสกัดที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืน โดยใช้สารละลายสกัดสองชนิดคือ กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการสกัดดึงเอานิกเกิลและโครเมียมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของถ่านกัมมันต์กลับคืน ขั้นตอนการศึกษามีดังนี้

1. นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
2. จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ ใส่ขวดรูปชมพู่ และเติมกรดหรือด่าง การศึกษานี้ใช้ กรดไนตริก ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อดึงเอานิกเกิลและโครเมียมออกจากถ่านกัมมันต์ โดยมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ทั้งหมดที่ใช้ดูดซับต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายสกัดที่เป็นกรดหรือด่าง
3. จากนั้นนำไปปั่นผสมบน Hot plate stirrer ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 150 rpm จากนั้นกรองแยกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และจากนั้นทำการย่อยตัวอย่างน้ำเสียหุบโลหะด้วยวิธี Nitric acid digestion และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4

ประสิทธิภาพในการนำโลหะหนักกลับคืนคำนวณดังสมการที่ 7 ข้างต้น และสมการที่ 8 (Ferraz, Tavares, and Teixeira, 2004) ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการนำโลหะหนักกลับคืน (\% Recovery)} = \frac{(C_f \times \frac{V}{m}) \times 100}{q} \quad (10)$$

C_f คือความเข้มข้นหลังดึงโลหะหนักกลับคืน (มิลลิกรัม/ลิตร)

q คือปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

V คือปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

m คือปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)

เมื่อทราบชนิดของสารสกัดที่เหมาะสมในการนำ निकเกิดและโครเมียมกลับคืนแล้ว จากนั้นนำสารสกัดที่เหมาะสมนี้ไปใช้ในการนำโลหะหนักกลับคืนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับแล้วในระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ เพื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการนำโลหะหนักกลับคืนแล้วไปใช้ดูดซับซ้ำในระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่อีกครั้ง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์โดยใช้คาร์บอนแบล็ค ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ ทำการกระตุ้นทางกายภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์และทดสอบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ซึ่งการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องศึกษาสภาวะหรือค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการดูดซับ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ประกอบด้วยค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณถ่านกัมมันต์ (Adsorbent dosage) และระยะเวลาการสัมผัส (Contaction time) ที่เหมาะสม จากนั้นศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ อีกทั้งศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมแบบคู่ และการน่านิกเกิลและโครเมียมกลับคืนจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

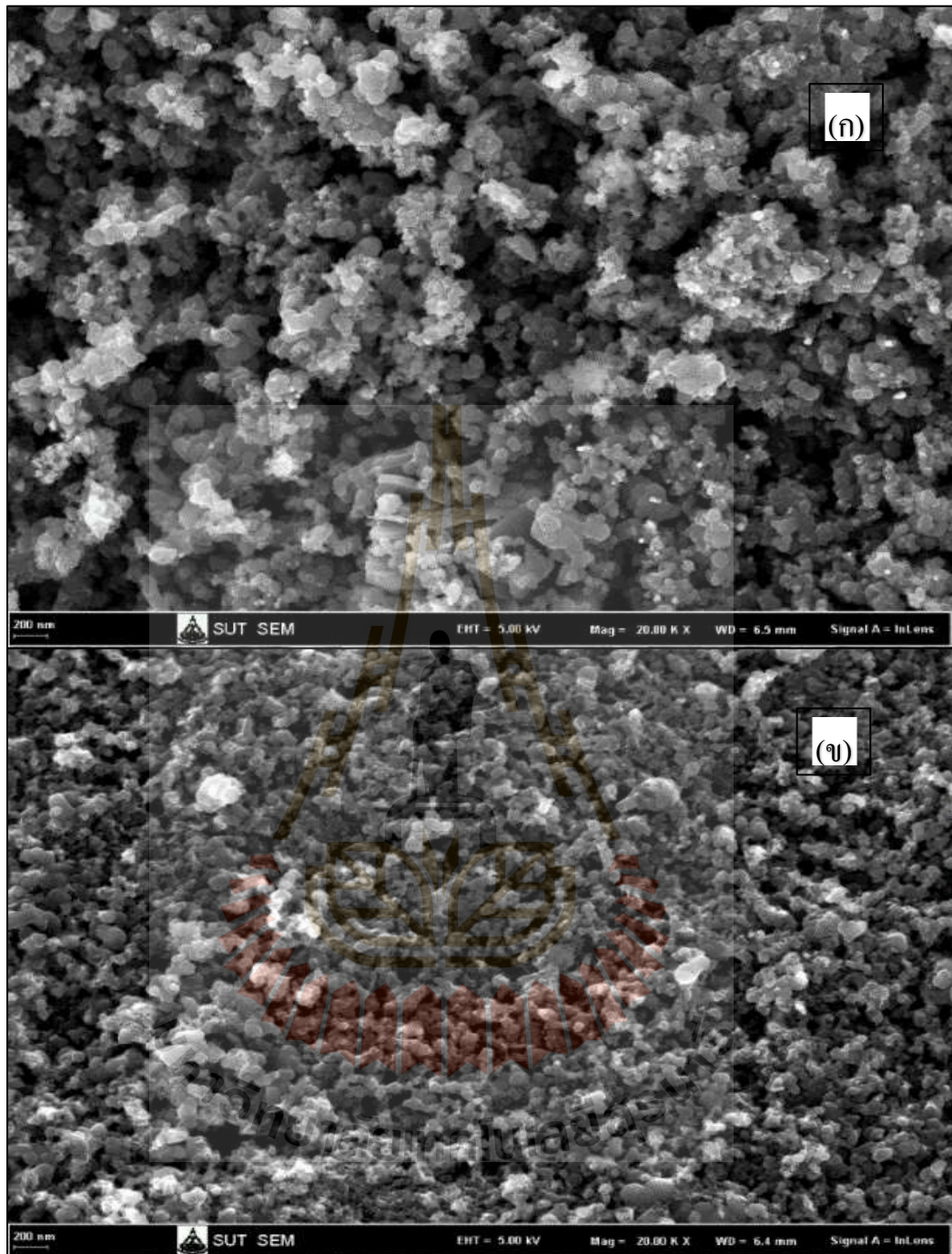
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

นำวัสดุยางรถยนต์มาทำเป็นถ่านกัมมันต์ โดยวัสดุที่ใช้คือ คาร์บอนแบล็คซึ่งเป็นส่วนที่ได้จากการเผายางรถยนต์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ โดยขอความอนุเคราะห์จากอุตสาหกรรมผลิตปิโตรเลียมด้วยกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์แห่งหนึ่ง นำคาร์บอนแบล็คดังกล่าวมากระตุ้นทางกายภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์ ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Gupta et al., 2012) จากนั้นนำไปศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นไปใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่ทำการศึกษาคือ ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้อง FE-SEM และศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง BET และคุณสมบัติทางเคมีคือ ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ซึ่งประกอบด้วยค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) และความหนาแน่นปรากฏ (Density appears) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีมีดังนี้

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

4.1.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ปัจจุบันนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ซึ่งตัวอย่างในการศึกษาคือคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังการกระตุ้นว่าลักษณะพื้นผิวมีความแตกต่างกันอย่างไร โดยสังเกตจากขนาดรูพรุน และการเรียงตัวของพื้นผิว การศึกษานี้จึงใช้กล้อง FE-SEM ด้วยกำลังขยาย 20000 เท่า เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวอย่างชัดเจน (ภาพที่ 4.1) จากผลการศึกษาพบว่าคาร์บอนแบล็คมีพื้นผิวขรุขระไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากพื้นผิวของคาร์บอนแบล็คมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เกาะอยู่ เช่น สารประกอบอะโรมาติก (น้ำมัน) จึงทำให้พื้นผิวไม่เป็นระเบียบเนื่องจากอนุภาคจับกันเป็นก้อน รูพรุนมีขนาดใหญ่ พื้นผิวในการดูดซับจึงน้อย ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ (Williams, 2013) จากการศึกษาวิจัยทำการล้างน้ำมันที่เกาะอยู่บนผิวของคาร์บอนแบล็คออกด้วย 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์พวกน้ำมันออกจากคาร์บอนแบล็คได้ ก่อนนำไปเผากระตุ้น (Gupta et al., 2012) ซึ่งหลังการกระตุ้นพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีพื้นผิวเป็นระเบียบ รูพรุนมีขนาดเล็กลงมีปริมาตรเพิ่มขึ้น และเห็นรูพรุนชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นอาจส่งผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Baccar et al., 2009)



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) ของคาร์บอนแบล็ค (ก) และถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ (ข) ที่กำลังขยาย 20000 เท่า

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ด้วยเทคนิค Energy dispersive spectrometer (EDX) (ตารางที่ 4.1) พบว่าคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 80.00 สอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาทำถ่านกัมมันต์ (Gupta et al., 2012; Williams, 2013) ซึ่งโดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70.00-90.00 (Gupta et al., 2012a; 2013b; Saleh and Danmaliki, 2016) และนอกจากนี้ยังพบธาตุชนิดอื่น เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ เป็นต้น (Hadi et al., 2016) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อองค์ประกอบคาร์บอนลดลง จะพบองค์ประกอบออกซิเจนเพิ่มขึ้นเนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวหรือรูพรุนเพิ่มขึ้น และทั้งคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์พบว่าไม่มีนิกเกิลและโครเมียมเป็นองค์ประกอบ จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวและธาตุองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ข้างต้น ทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นหลังการกระตุ้น ดังนั้นเพื่อความชัดเจนของผลการศึกษา ในลำดับการศึกษาต่อไปจึงทำการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน เพื่อสนับสนุนผลการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ข้างต้น

ตารางที่ 4.1 ธาตุองค์ประกอบของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ง.)

ตัวดูดซับ	ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)								แหล่งอ้างอิง
	C	O	Si	S	Zn	Zr	Mo	Pt	
คาร์บอนแบล็ค	84.01±13.13	2.54±1.22	0.91±0.87	3.38±4.25	7.12±9.64	1.33±1.82	0.71±1.60	N.D.	งานวิจัยนี้
ถ่านกัมมันต์	83.51±5.90	4.68±3.05	0.80±1.78	3.07±0.85	1.27±0.94	1.45±3.24	N.D.	5.22±5.29	
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	91.96	8.04	-	-	-	-	-	-	Gupta et al. (2012)
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	93.00	7.00	-	-	-	-	-	-	Gupta et al. (2013)
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	93.95	6.05	-	-	-	-	-	-	
ถ่านกัมมันต์ จากยางรถยนต์	77-88	-	-	-	-	-	-	-	Saleh and Danmaliki (2016)

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ตรวจวิเคราะห์ธาตุไม่พบ

- หมายถึง งานวิจัยที่อ้างอิงไม่ได้ศึกษาวิเคราะห์

- ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

4.1.1.2 ลักษณะพื้นผิว (Texture)

เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนก่อนและหลัง กระตุ้น ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับ (Hadi et al., 2015; Worch, 2012) ศึกษาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (Brunauer, Emmett and teller: BET) ด้วยวิธีการดูดซับไนโตรเจนไว้บนผิวที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (77 เคลวิน) (Acevedo and Barriocanal, 2015; Hadi et al., 2016) ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้คือขนาดพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็ค และถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 58.37 และ 149.74 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยทั่วไปพบคาร์บอนแบล็คมีขนาดพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 64.50-83.80 ตารางเมตรต่อกรัม (Williams, 2013) และผลการศึกษาพบว่าปริมาตรรูพรุนของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีขนาด 0.54 และ 1.05 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) สังเกตได้ว่าขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยปริมาตรรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นรูพรุนประเภทขนาดกลาง (Mesopores) (Williams, 2013; Saleh and Danmaliki, 2016) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 27.99 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนประเภทขนาดกลางต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร โดยเหมาะสำหรับเป็นตัวดูดซับสารประเภทของเหลว (Bansal et al., 2005) และผลการศึกษานี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสังเกตได้จากผลภาพจากกล้อง FE-SEM ประกอบกัน

ตารางที่ 4.2 ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน (ภาคผนวก จ.)

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรูพรุนรวม (ลบ.ซม./ก.)	เส้นผ่านศูนย์กลางรู พรุน (นาโนเมตร)	แหล่งอ้างอิง
คาร์บอนแบล็ค	58.37	0.54	37.30	งานวิจัยนี้
ถ่านกัมมันต์	149.74	1.05	27.99	
คาร์บอนแบล็ค	72-78	0.30-0.50	183.00	(Martinez et al., 2015)
ถ่านกัมมันต์	562.00	0.97	-	(Gupta et al., 2012)
ถ่านกัมมันต์	175.68	0.07	2.58	(Karmacharya et al., 2016)
คาร์บอนแบล็ค	183.21	0.30	-	(Saleh and Danmaliki,
ถ่านกัมมันต์	220.48 ถึง 473.35	0.44-0.70	-	2016)

หมายเหตุ – หมายถึง งานวิจัยที่อ้างอิงไม่ได้ศึกษาวิเคราะห์

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

4.1.2.1 ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

4.1.2.1.1. การดูดซับสารละลายไอโอดีน (Iodine Number)

ผลการศึกษาพบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์มีค่า 371.84 และ 1,506.13 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเผากระตุ้นคาร์บอนแบล็คให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากการดูดซับสารละลายไอโอดีนซึ่งหากค่าการดูดซับสูงจะพบว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Baccar et al., 2009) และยิ่งแสดงถึงแนวโน้มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน (Marsh et al., 2006) ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีคุณสมบัติการดูดซับสารละลายไอโอดีนตามค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์กำหนด ซึ่งกำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) จากผลการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ข้างต้นพบว่าวัสดุยางรถยนต์ที่นำมาทำถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนคล้ายกับวัสดุทางธรรมชาติ เช่น เปลือกเมล็ดยางและเปลือกต้นไผ่ (Saka, 2012; Giavarini, 1985) เป็นต้น (ตารางที่ 4.3) หากมองในมุมของการเลือกวัสดุในการนำไปใช้ทำถ่านกัมมันต์เพื่อการดูดซับ ยางรถยนต์ถือเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความเหมาะสมในการนำมาทำถ่านกัมมันต์ โดยความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ขึ้นอยู่กับวิธีการกระตุ้น หากเป็นการกระตุ้นทางกายภาพโดยการเผาที่อุณหภูมิสูง จะพบว่าการเผากระตุ้นคาร์บอนแบล็คให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น มีผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น (Williams, 2013) เนื่องจากอะตอมคาร์บอนถูกทำลายเกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุน (Hadi, Yeung, Guo, Wang, and McKay, 2016) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้เผากระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับสารละลายไอโอดีน

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัม (มก./ก.)	แหล่งอ้างอิง
คาร์บอนแบล็ค	371.84±0.32	งานวิจัยนี้
ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์	1,506.13±1.29	
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดยาง	1,326	(Sun and Jiang, 2010)
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้นไผ่	1,209	(Saka, 2012)
ถ่านกัมมันต์จากเศษยาง	850	(Giavarini, 1985)

หมายเหตุ -ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่ยังค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่พบค่าเฉลี่ย

4.1.2.1.2. ความหนาแน่นปรากฏ (Density appears)

คาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.80 และ 0.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่าหลังการกระตุ้นมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีค่าความหนาแน่นลดลง เนื่องจากถ่านกัมมันต์ถูกทำลายโครงสร้างด้วยการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมคาร์บอนหรือไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์มีปริมาณลดลง (Hadi et al., 2016; Williams, 2013) จึงพบว่าค่าความหนาแน่นปรากฏลดลงหลังการกระตุ้น ส่งผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนและความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Baccar et al., 2009) สอดคล้องกับผลการศึกษาข้างต้น โดยจะเห็นว่าค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้นหลังการกระตุ้น และพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นปรากฏตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด นั่นคืออยู่ในช่วง 0.2-0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ในปัจจุบันพบถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่าความหนาแน่นปรากฏอยู่ในช่วง 0.38-0.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Hager et al., 1998) เมื่อเทียบค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ทางการค้ากับถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ผลิตนี้พบว่ามีค่าความหนาแน่นปรากฏใกล้เคียงกัน ซึ่งมีแนวโน้มว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีคุณสมบัติคล้ายกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า สามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดสี สารอินทรีย์ และโลหะหนักในน้ำเสียได้ (Saleh and Gupta, 2014; Acosta et al., 2016)

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นปรากฏ

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นปรากฏ (ก./ลบ.ซม.)	แหล่งอ้างอิง
คาร์บอนแบล็ค	0.80	งานวิจัยนี้
ถ่านกัมมันต์	0.73	
คาร์บอนแบล็ค	2.01	(Martinez et al., 2015)
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (PAC)	0.38-0.74	(Larry Hager et al., 1998)
ถ่านกัมมันต์	0.20-0.75	(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

หมายเหตุ -ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่ยังค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

จากการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ในข้างต้น พบว่า ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ซึ่งสามารถใช้ดูดซับโลหะหนักได้เหมือน ถ่านกัมมันต์ทั่วไป (Gupta et al., 2012a; 2013b; Saleh et al., 2013; Karmacharya et al., 2016) จึงสามารถใช้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในลำดับต่อไป ทั้งนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาสถานะในการดูดซับที่เหมาะสม

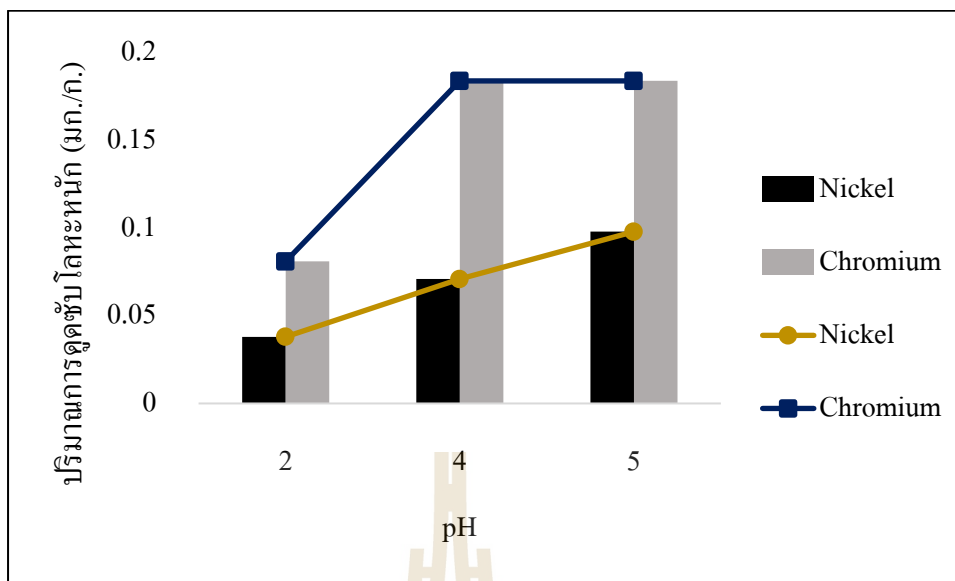
4.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

การดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีนิกเกิลและโครเมียมผสมอยู่รวมกัน ทำการศึกษาเพื่อทราบสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังนี้คือ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH 2,4,5) ระยะเวลาในการสัมผัส (30, 60, 90, 120, 150 นาที) และปริมาณถ่านกัมมันต์ โดยมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ฉ) ซึ่งพบว่ามีอุณหภูมิ 24.5 องศาเซลเซียส ผลการศึกษามีดังนี้

4.2.1 การศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

ผลการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาในการสัมผัส ณ เวลาที่กำหนด ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5 และ 4.6) ซึ่งผลการดูดซับที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 กรัม ระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที พบว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้ 0.038 และ 0.081 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4 สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียม 0.071 และ 0.184 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้เท่ากับ 0.098 และ 0.184 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 4.2) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมแล้วพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมมากกว่าร้อยละ 50.00 และ 99.99 ตามลำดับ ซึ่งพบนิกเกิลมีความเข้มข้น 4.844 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่ไม่พบโครเมียมหลังการดูดซับ เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเป็นกรด เช่น ที่ pH 2 และ pH 4 พบมีประจุบวกของโปรตรอน (H^+ หรือ H_3O^+) มากกว่าที่ pH 5 และมีประจุของโปรตรอน (H^+ หรือ H_3O^+) มากกว่าประจุของนิกเกิล (Ni^{2+}) (Gupta et al., 2013) และประจุของโครเมียม (Cr^{3+} , $Cr(OH)^{2+}$ หรือ $Cr(OH)_2^+$)

(Gonsalvesh et al., 2016) ประจุของโปรตรอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (Langmuir, 1997) จึงทำให้โปรตรอน (H^+ หรือ H_3O^+) ขัดขวางการดูดซับไอออนของนิกเกิลและโครเมียมบนผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีประจุลบ (Bansal et al., 2005; Gonsalvesh et al., 2016; Saleh et al., 2013; Gupta et al., 2013; Langmuir, 1997) สังเกตได้จากประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมที่ pH 2 พบมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยกว่าร้อยละ 20.00 และ 50.00 ตามลำดับ และที่ pH 4 พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลน้อยกว่าร้อยละ 40.00 ซึ่งมีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่ pH 5 ขณะเดียวกันได้ทำการศึกษาการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่ pH 7 และ pH 9 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์เกิดการตกตะกอน (Gupta et al., 2013) อาจเนื่องมาจากเกิดการจับกันระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับไอออนของนิกเกิล (Ni^{2+}) เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ไอออนบวกกับไอออนลบเกิดการจับกัน เมื่อโมเลกุลใหญ่ขึ้นจึงเกิดการตกตะกอนของ $Ni(OH)_2(s)$ (Gonsalvesh et al., 2016; Hasar, 2003) และเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ถูกปรับให้มีค่าความเป็นกรดในช่วง pH 7-12 โครเมียมจะอยู่ในรูปไอออนที่เป็นกลาง ($Cr(OH)_3$) นั้นหมายถึงการดูดซับจะลดลง (Gupta et al., 2013; Alexandre-Franco, Fernandez-Gonzalez, Alfaro-Dominguez, and Gomez-Serrano, 2011) ซึ่งผลการทดลองพบว่ามีการตกตะกอนเกิดขึ้นภายในขวดทดลอง ดังนั้นค่า pH 7 และ pH 9 จึงอาจจะไม่เหมาะสมในการปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้นจึงสามารถศึกษาค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ได้ไม่เกิน pH 5 เนื่องด้วยมีประสิทธิภาพในการดูดซับทั้งนิกเกิลและโครเมียมดีที่สุดซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น โดยจากงานวิจัยของ Tewari et al. (1989) ศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมในช่วง pH 5.5-8 พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ pH 5.5 และศึกษาการดูดซับนิกเกิลพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลสามารถดูดซับได้ดีทั้งสภาวะที่เป็นกรดและด่าง ซึ่งงานวิจัยที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์โดยมีนิกเกิลและโครเมียมผสมรวมกัน จึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรดต่างที่ pH 5 เพียงค่าเดียวในการศึกษาการดูดซับ เนื่องด้วยการใช้ค่าความเป็นกรดต่างเพียงหนึ่งค่าในการกำจัดนิกเกิลร่วมกับโครเมียมสามารถลดระยะเวลาในการกำจัด เนื่องจากไม่ต้องปรับค่าความเป็นกรดต่างหลายครั้งทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมี



ภาพที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน

ดังนั้นจึงใช้ค่าความเป็นกรดต่างที่ pH 5 ในการปรับ pH ของน้ำเสียขุบโลหะเพื่อใช้ในการศึกษาการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ในลำดับต่อไป อย่างไรก็ตามสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ระยะเวลาในการสัมผัสถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญ ซึ่งสามารถทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับ ณ เวลาต่างๆ จนถึงจุดสมดุล ดังจะกล่าวในลำดับถัดไป

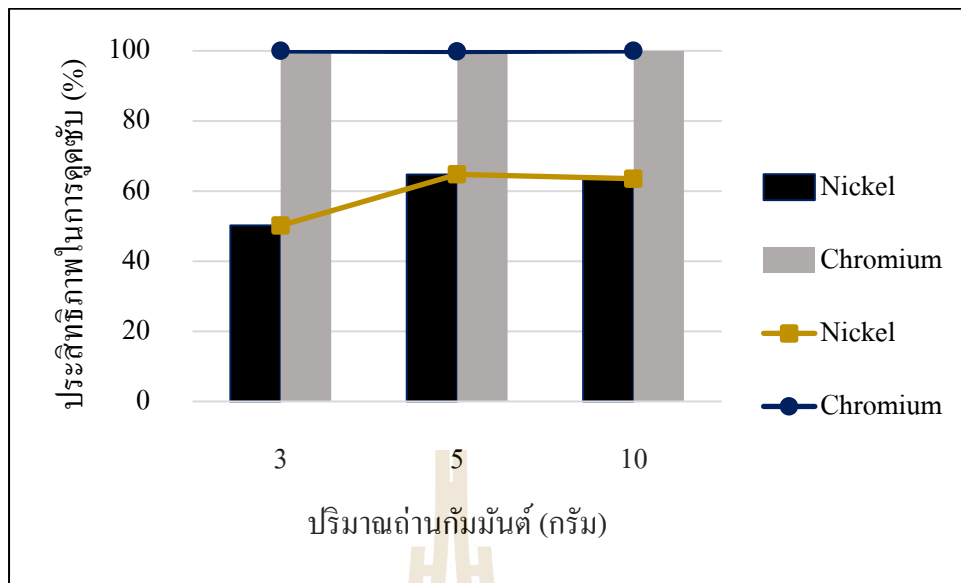
4.2.2 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัส (Contact time)

เพื่อให้ทราบถึงระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สูงสุด ผลจากการศึกษาพบว่าการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาในการสัมผัส ณ เวลาต่างๆ มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกัน เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่ช่วงเวลา 30 นาทีแรก หากสังเกตผลการศึกษาที่ใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม ณ เวลาในการสัมผัสต่างๆ จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที สามารถดูดซับนิกเกิลได้ 0.098, 0.093, 0.095, 0.097 และ 0.101 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสามารถดูดซับโครเมียมได้ 0.184 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ช่วงระยะเวลาสัมผัสต่างๆ เช่นเดียวกัน ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลมากกว่าร้อยละ 40.00 ที่ระยะเวลาสัมผัส 60, 90 และ 120 นาที และมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 50.00 ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 และ 150 นาที และประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมมากกว่าร้อยละ 99.99 ทุกช่วงระยะเวลาสัมผัสต่างๆ เท่ากัน โดยไม่พบโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการดูดซับ (ตารางที่ 4.5 และ 4.6) ทั้งนี้อาจเนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 3 กรัม มีพื้นที่ผิวมากพอสำหรับการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะเวลา 30 นาที ทำให้

ระยะเวลาสัมผัสหลังจาก 30 นาที มีค่าการดูดซับใกล้เคียงกัน จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าระยะเวลาในการสัมผัสของการดูดซับที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านกัมมันต์และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ (Karmacharya et al., 2016; Gupta et al., 2013) จากการศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียม พบว่าระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที มีความเหมาะสมในการดูดซับทั้งนิกเกิลและโครเมียม

4.2.3 การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นจาก 3, 5, และ 10 กรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลมีประสิทธิภาพร้อยละ 50.17, 64.77 และ 63.51 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเข้มข้นหลังการดูดซับเท่ากับ 4.844, 3.425 และ 3.546 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99.99 ที่ปริมาณ 3 และ 10 กรัม โดยไม่พบโครเมียมหลังการดูดซับ และพบว่าที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมร้อยละ 99.83 โดยความเข้มข้นของโครเมียมหลังการดูดซับเท่ากับ 0.016 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 4.5 และ 4.6) สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นจาก 3 กรัม เป็น 5 กรัม เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005) และประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลลดลงจากปริมาณ 5 กรัม เป็น 10 กรัม ซึ่งไม่สอดคล้องกับความสมดุลของวัสดุ (Materials balance) คือ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์หรือปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาดังกล่าวอาจเนื่องมาจากอัตราการสัมผัสหรือความเร็วของการเขย่าเพื่อให้เกิดการดูดซับไม่เหมาะสม และอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์กับปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับไม่เหมาะสม โดยทั้งนี้หากอัตราการสัมผัสหรือเขย่ามีความเร็วรอบเพิ่มขึ้น พบว่าการดูดซับจะใช้ระยะเวลานาน (Cussler, 2008) และการดูดซับโครเมียมพบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 3, 5 และ 10 กรัม เนื่องจากถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม อาจจะสามารถดูดซับโครเมียมได้เกือบหมด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพียงพอต่อการดูดซับโครเมียม เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเป็น 5 และ 10 กรัม จึงไม่เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพ ดังนั้นปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมคือ 3, 5 และ 10 กรัม (ภาพที่ 4.3) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับทั้งนิกเกิลและโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 50.00 และ 99.99 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 กรัม มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อลดการใช้ถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและ โครเมียมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล

ถ่านกัมมันต์ (ก.)	pH	ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)														
		30			60			90			120			150		
		ความเข้มข้น (มก./ล)	ปริมาณที่ถูก ดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล)	ปริมาณที่ถูก ดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิ ภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล)	ปริมาณที่ถูก ดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิ ภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล)	ปริมาณที่ถูก ดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิ ภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล)	ปริมาณที่ถูก ดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิ ภาพ (ร้อยละ)
2	7.839±0.086	0.038±0.002	19.36±0.889	7.976±0.057	0.035±0.001	17.95±0.591	7.645±0.054	0.042±0.001	21.35±0.555	7.679±0.126	0.041±0.003	21.00±1.294	7.580±0.050	0.043±0.001	22.02±0.512	
3	4	6.172±0.007	0.071	36.50±0.068	6.693±0.017	0.061	31.14±0.179	6.610	0.062	32.00	6.674±0.013	0.061	31.34±0.136	6.652±0.029	0.061±0.001	31.57±0.296
5	4.844±0.257	0.098±0.005	50.17±2.643	5.095±0.106	0.093±0.002	47.58±1.085	4.996±0.223	0.095±0.005	48.60±2.296	4.882±0.334	0.097±0.007	49.77±3.437	4.667±0.731	0.101±0.015	51.99±7.522	
5	2	7.892±0.052	0.061±0.002	18.81±0.530	7.725±0.231	0.067±0.008	20.53±2.379	7.785±0.105	0.065±0.004	19.90±1.076	7.797±0.030	0.064±0.001	19.79±0.311	7.584±0.043	0.071±0.002	21.98±0.445
5	4	6.944±0.020	0.093±0.001	28.56±0.203	6.914±0.024	0.094±0.001	28.87±0.245	6.975±0.041	0.092±0.001	28.24±0.423	6.964±0.011	0.092	28.36±0.117	6.488±0.017	0.108±0.001	33.25±0.179
5	5	3.425±0.611	0.210±0.020	64.77±6.284	3.680±0.324	0.201±0.011	62.14±3.331	3.737±0.155	0.199±0.005	61.56±1.595	3.482±0.346	0.208±0.012	64.18±3.560	3.531±0.293	0.206±0.010	63.67±3.013
2	6.560±0.251	0.032±0.003	32.51±2.585	6.644±0.189	0.031±0.002	31.65±1.941	6.286±0.074	0.034±0.001	35.33±0.764	5.860±0.670	0.039±0.007	39.71±6.895	6.381±0.192	0.033±0.002	34.35±1.976	
10	4	6.278±0.060	0.034±0.001	35.41±0.622	5.906±0.211	0.038±0.002	39.24±2.170	6.062±0.086	0.037±0.001	37.64±0.887	5.982±0.040	0.037	38.46±0.407	6.157±0.076	0.036±0.001	36.66±0.782
5	5	3.546±0.195	0.062±0.002	63.51±2.001	4.467±1.961	0.053±0.020	54.04±20.177	5.868±0.126	0.039±0.001	39.63±1.292	5.700±0.272	0.040±0.003	41.40±2.797	5.833±0.040	0.039	39.99±0.407

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม

ถ่านกัมมันต์ (ก.)	pH	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)															
		30			60			90			120			150			
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	
2	2	5.148±0.990	0.081±0.020	43.92±10.784	5.129±1.012	0.081±0.020	44.13±11.019	2.651±0.314	0.131±0.006	71.12±3.421	1.830±0.223	0.147±0.005	80.06±2.423	1.60±1.085	0.152±0.022	82.60±11.814	
	3	4	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99
	5	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	N.D.	0.184	>99.99	
5	2	6.723±0.126	0.082±0.004	26.76±1.369	5.623±0.152	0.119±0.005	38.75±1.654	4.965±0.212	0.141±0.007	45.91±2.312	4.579±0.572	0.153±0.019	50.12±6.220	4.06±0.082	0.171±0.003	55.81±0.896	
	4	N.D.	0.306	>99.99	N.D.	0.306	>99.99	N.D.	0.306	>99.99	N.D.	0.306	>99.99	N.D.	0.306	>99.99	
	5	0.016±0.006	0.306	99.83±0.059	0.016±0.006	0.310	99.83±0.059	0.028±0.006	0.305	99.73±0.059	0.022±0.006	0.305	99.76±0.059	0.02±0.005	0.305	99.76±0.059	
10	2	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	
	4	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	
	5	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	N.D.	0.092	>99.99	

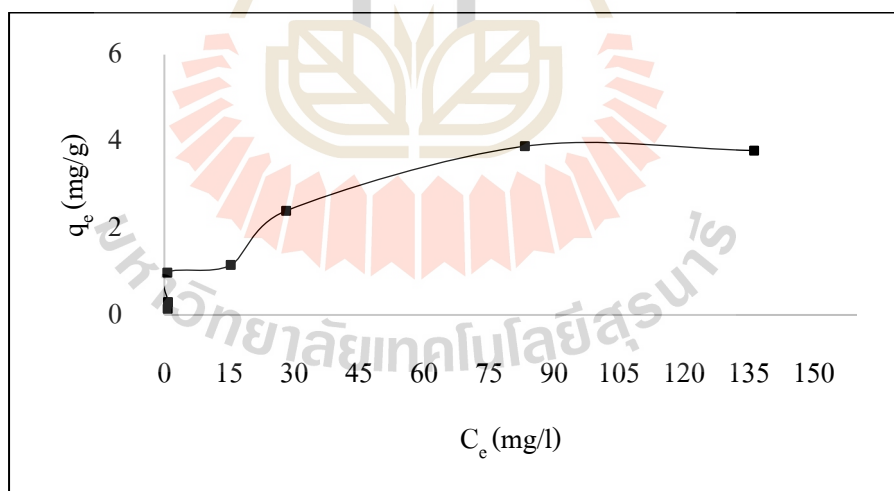
หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

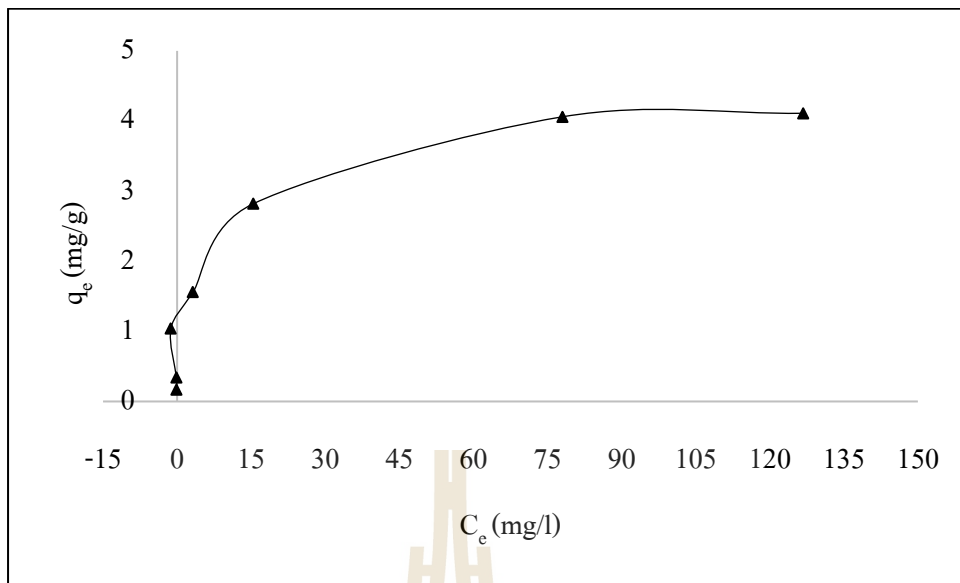
4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากผลการศึกษาข้างต้น จึงได้ดำเนินการ โดยปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 ใช้ตัวดูดซับปริมาณ 3 กรัม และระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที ซึ่งน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมแบบผสมต่างกันคือ 5, 10, 30, 50, 100, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ฉ.) ทำการศึกษาเพื่อทราบถึงลักษณะการดูดซับโลหะหนักบนผิวของถ่านกัมมันต์ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Homogeneous) หรือแบบหลายชั้น (Heterogeneous) โดยใช้สมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm) และสมการฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม (Freundlich isotherm) ในการอธิบายการดูดซับ (Gonsalvesh et al., 2016) จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์มีจุดสมดุลในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมที่ความเข้มข้นจาก 200 เป็น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ปริมาณ 3 กรัมสามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้มีประสิทธิภาพสูงสุดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมประมาณ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.4 และ 4.5) และจากผลการศึกษาความสัมพันธ์ของกราฟระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักและปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับตามสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม พบว่ามีค่า R^2 ของการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมเท่ากับ 0.9414 และ 0.9938 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.6 และ 4.7) และความสัมพันธ์ของกราฟตามสมการของฟรุนดลิชไอโซเทอร์มมีค่า R^2 ของการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมเท่ากับ 0.7713 และ 0.7416 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.8 และ 4.9) โดยจะเห็นว่า การดูดซับนิกเกิลและโครเมียมเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์มมากกว่าฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้หนึ่งมากกว่า (ตารางที่ 4.7) (Gupta et al., 2013; Karmacharya et al., 2016) ซึ่งค่า R^2 คือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักต่อปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือหลังการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมแบบชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งมีสมมติฐานคือแต่ละโมเลกุลของสารมลพิษจะถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้เพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ตำแหน่งใกล้กัน หรือไม่มี การดูดซับซ้อนทับกัน (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005; Langmuir, 1997) สามารถอธิบายประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์ได้อย่างชัดเจน โดยไม่ต้องคำนึงถึงสิ่งรบกวนที่อาจจะส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับในลำดับการศึกษาต่อไป โดยจากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับนิกเกิลได้มากกว่าโครเมียม และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Maximum adsorption capacity, Q_0) เท่ากับ 4.3956 และ 4.1000 มิลลิกรัมต่อ

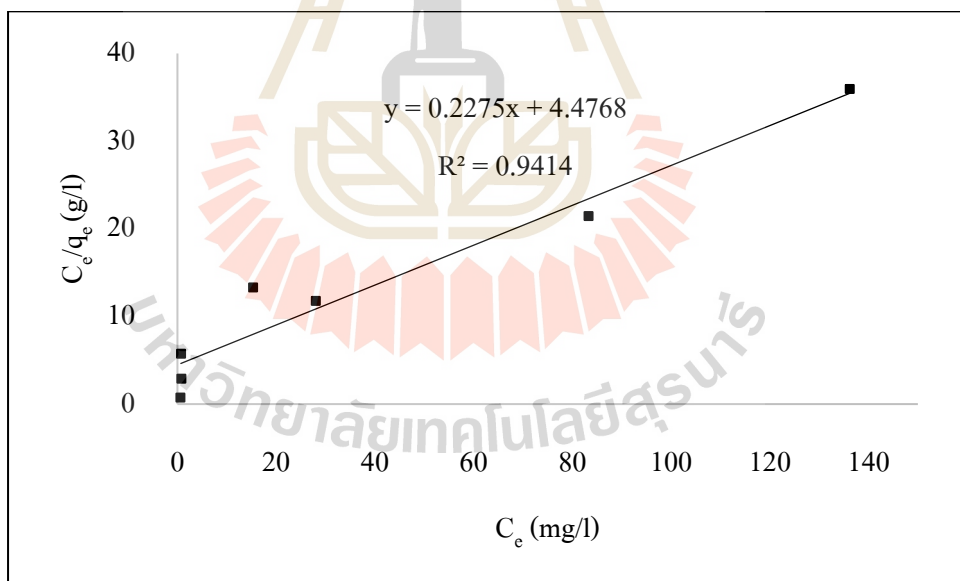
กรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความสามารถของธาตุนิกเกิลและโครเมียมในการดึงอิเล็กตรอนของสารอื่นเข้าหาตัวเอง (Electronegativity: EN) โดยมีค่าเท่ากับ 1.8 และ 1.6 ตามลำดับ (เกษม พลายแก้ว, 2553) แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับนิกเกิลมากกว่าโครเมียม เนื่องจากนิกเกิลมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของถ่านกัมมันต์เข้าหาตัวเองได้ดีกว่าโครเมียม ส่วนค่าคงที่ของพลังงานการดูดซับ (The energy of adsorption, b) ของนิกเกิลและโครเมียมมีค่าเท่ากับ 0.0508 และ 1.3897 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีพลังงานการดูดซับในโครเมียมมากกว่านิกเกิล จากสมการฟรุนดลิช ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (K_p) พบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับโครเมียมได้มากกว่านิกเกิล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4793 และ 0.3902 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ และพบว่าค่า $1/n$ ของนิกเกิลและโครเมียมมีค่าเท่ากับ 0.4845 และ 0.5058 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) ซึ่งพบว่านิกเกิลและโครเมียมมีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากปริมาณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีปริมาณจำกัดในการดูดซับโลหะหนัก โดยมีพื้นที่ผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005; Langmuir, 1997)



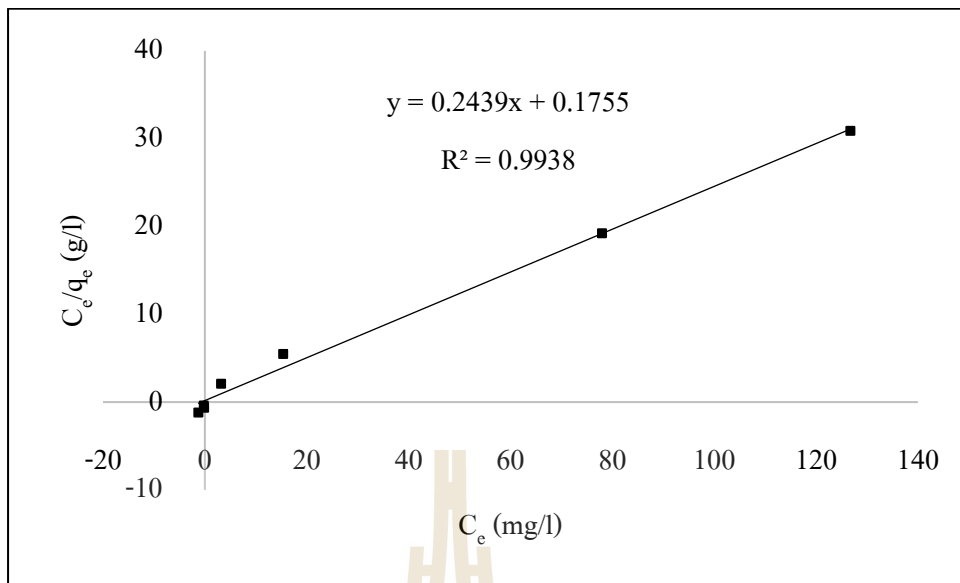
ภาพที่ 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของนิกเกิล



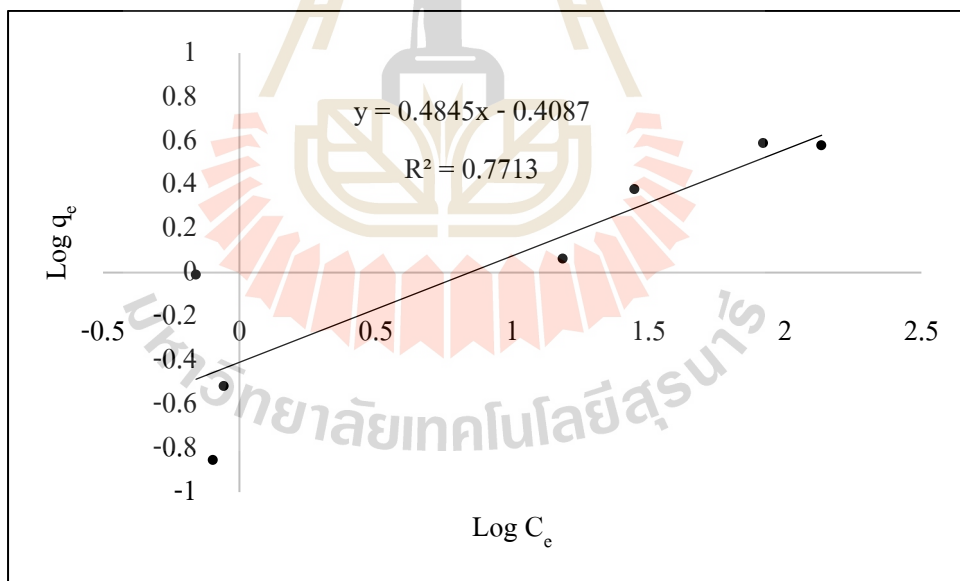
ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับของโครเมียม



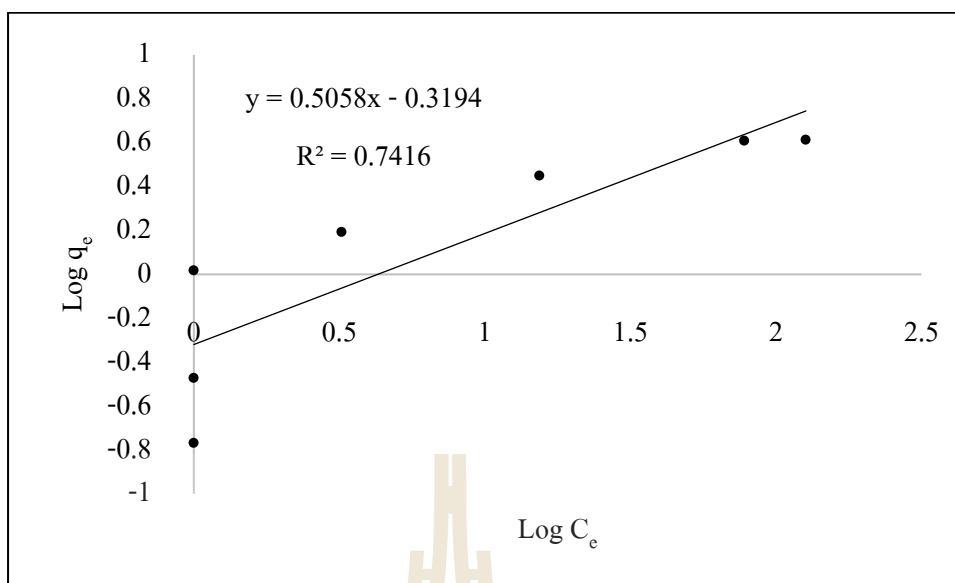
ภาพที่ 4.6 การดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของนิกเกิล



ภาพที่ 4.7 การดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของโครเมียม



ภาพที่ 4.8 การดูดซับแบบฟรุนดลิชไอโซเทอร์มของนิกเกิล



ภาพที่ 4.9 การดูดซับแบบฟรุนดิชของโครเมียม

ตารางที่ 4.7 ค่าสหสัมพันธ์ถดถอย (correlation coefficient: R^2) ของไอโซเทอร์ม

โลหะหนัก	แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม			ฟรุนดิชไอโซเทอร์ม		
	Q_0 (mg/g)	b (l/mg)	R^2	K_f (l/g)	$1/n$	R^2
นิกเกิล	4.3956	0.0508	0.9414	0.3902	0.4845	0.7713
โครเมียม	4.1000	1.3897	0.9938	0.4793	0.5058	0.7416

4.4 การดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียขุบโลหะของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียขุบโลหะเท่ากับ 400.712 และ 953.448 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และใช้ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมมากกว่าร้อยละ 80.00 ที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ ใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้มากกว่า 11.116 และ 25.459 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.8) (ภาคผนวก จ.) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 3 กรัม มีพื้นที่ผิวสำหรับดูดซับนิกเกิลและโครเมียมที่ความเข้มข้นดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 30 นาทีแรก เนื่องด้วยถ่านกัมมันต์เกิดการดูดซับจนอิ่มตัวจึงไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้อีกเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่าถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม มีความสามารถในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้ประมาณร้อยละ 80.00 ณ ระยะเวลา 30 นาที จาก

ผลการศึกษาข้างต้นพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนได้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยการเผาให้ความร้อน พบมีพื้นผิวเป็นประจุลบ (Gupta et al., 2012a; 2013b; Saleh et al., 2013) ซึ่งพบมีหมู่ฟังก์ชันของกลุ่มฟีนอล กลุ่มเอสเทอร์ กลุ่มคาร์บอนิล และกลุ่มของคาร์บอกซิลอยู่ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์จะดูดซับนิกเกิลและโครเมียมด้วยการใช้ไอออนลบที่ผิวจับกับไอออนบวกของนิกเกิล (Ni^{2+}) และโครเมียม ($Cr(OH)^{2+}$ หรือ $Cr(OH)_2^+$) ที่อยู่ในน้ำเสีย (Gupta et al., 2013; Gonsalvesh et al., 2016) เป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ด้วยการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (เกษม พลายนแก้ว, 2553) เกิดการจับพันธะกัน (Gupta et al., 2012) โดยพันธะที่เกิดขึ้นเป็นพันธะโคเวเลนต์ (Arup and SenGupta, 2002)

ตารางที่ 4.8 ระยะเวลาในการสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มก./ล.)		ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)		ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)	
	Ni	Cr	Ni	Cr	Ni	Cr
	30	65.754±0.879	189.730±0.733	11.165±0.029	25.457±0.024	83.59±0.219
60	67.244±0.552	186.579±0.476	11.116±0.018	25.562±0.016	83.22±0.138	80.43±0.050
90	66.842±0.370	185.541±0.767	11.129±0.012	25.597±0.026	83.32±0.092	80.54±0.080
120	65.669±0.260	183.526±1.283	11.168±0.009	25.664±0.043	83.61±0.065	80.75±10.135
150	66.502±0.173	169.628±1.023	11.140±0.006	26.127±0.034	83.40±0.043	82.21±0.127

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมากกว่าร้อยละ 80.00 จึงนำถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ไปศึกษาการบำบัดโลหะหนักในระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ในลำดับต่อไป

4.5 การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่

4.5.1 ผลของอัตราการไหลของระบบที่เหมาะสม

การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ ทำการศึกษาเพื่อทราบอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่เหมาะสมในการบำบัด โดยใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุมชนและปรับให้มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ซึ่งได้จากการศึกษาข้างต้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนอยู่ในช่วง 128-131 และ 203-209 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบที่กำหนดในการศึกษานี้คือ 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ภายในคอลัมน์บรรจุชั้นของถ่านกัมมันต์คิดเป็นร้อยละ 50.00 ของพื้นที่คอลัมน์ (Gupta et al., 2012) บรรจุถ่านกัมมันต์ได้ปริมาณ 20 กรัม โดยการเดินระบบเริ่มจากจ่ายน้ำเสียขุบโลหะเข้าระบบในคอลัมน์แรก เมื่อน้ำเสียผ่านการดูดซับจากคอลัมน์แรกจะถูกจ่ายเข้าสู่คอลัมน์ที่สองด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลของของเหลว (Peristaltic pump) ซึ่งทั้งสองคอลัมน์ใช้อัตราการไหลเท่ากัน ทำการเดินระบบเป็นแบบต่อเนื่อง (ตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11) (ภาคผนวก จ.) ผลการทดสอบพบว่า อัตราการไหลที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลมากกว่าร้อยละ 90.00 ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมงแรก โดยมีนิกเกิลออกจากระบบ 2.824 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงเหลือร้อยละ 53.24 ที่ระยะเวลา 40 ชั่วโมง โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ระบบสามารถบำบัดโครเมียมได้มากกว่านิกเกิล กล่าวคือระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 99.99 โดยไม่พบโครเมียมในน้ำเสียที่ออกจากระบบตั้งแต่ระยะเวลาที่ 4 ชั่วโมงแรกของการศึกษา อย่างไรก็ตามหลังจากที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมงผ่านไป ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเริ่มลดลงเหลือร้อยละ 31.82 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัมที่อยู่ในระบบสามารถบำบัดนิกเกิลและโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เมื่อถ่านกัมมันต์เกิดการดูดซับจนถึงจุดสมดุลแล้วจะไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้อีก เรียกว่าจุดสมดุลของการดูดซับ (Karmacharya et al., 2016; Gonsalvesh et al., 2016) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที พบมีประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลมากกว่าร้อยละ 90.00 ที่ระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมงแรก และลดลงเหลือ 53.86 หลังจากระยะเวลาที่ 16 ชั่วโมง โดยที่ระบบสามารถบำบัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.99 ในระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากระยะเวลาบำบัดที่กล่าวนี้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเหลือ 16.63 ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมมีประสิทธิภาพสูงสุดในระยะเวลาบำบัด 8 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยระบบสามารถดูดซับปริมาณนิกเกิลและโครเมียมได้ 6.484 และ 10.489 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาพที่ 4.10 และ 4.11) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบระหว่างอัตราการไหลที่ 0.5 กับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบเพื่คเบดคอลัมน์แบบคู่สามารถบำบัดนิกเกิลและโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90.00 และ 99.99 ตามลำดับ ด้วยระยะเวลาบำบัดนานกว่า เนื่องจากอัตราการไหลที่ 1 มิลลิลิตรต่อนาที เกิดการดูดซับแบบรวดเร็วระหว่างถ่านกัมมันต์กับโลหะหนัก อาจเกิดจากการดูดซับยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวหรือจุดสมดุล (Gupta et al., 2012) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมดีที่สุดประมาณร้อยละ 99.50 และ 95.79 ใน

ระยะเวลาบำบัด 8 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสามารถบำบัดนิกเกิลและโครเมียมได้ปริมาณ 6.215 และ 9.666 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 4.10 และ 4.11) การศึกษาบางช่วงเวลาที่ทำการเดินระบบพบประสิทธิภาพของการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมมีแนวโน้มลดลง ในระยะเวลา 40 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้น ในระยะเวลา 56 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่งผลทำให้ความดันในระบบลดลง (Pressure drop) เนื่องจากน้ำเสียซุบโลหะถูกขังอยู่ในคอลัมน์เป็นบางช่วงเวลา ปัญหานี้พบได้ในถ่านกัมมันต์ประเภทผง (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2542; Bansal et al., 2005; Hager et al., 1998; Edzwald, 2011; Chen, 2017)



ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นและหลังการดูดซับที่อัตราการไหลแตกต่างกัน

ระยะเวลา เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก (มก./ล.)						ความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการดูดซับ (มก./ล.)					
	นิกเกิล			โครเมียม			นิกเกิล			โครเมียม		
	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่
0	128.107	130.495±0.081	124.915±0.133	203.187	209.774±0.354	201.819±0.462	128.110±0.238	130.499±0.246	124.916±0.409	203.190±0.700	209.780±0.577	201.816±0.255
4	128.107±0.021	130.495±0.081	124.915±0.133	203.187	209.774±0.354	201.819±0.462	2.824±0.026	2.503±0.156	3.991±0.025	N.D.	N.D.	8.495±0.924
8	128.107±0.021	130.495±0.081	124.915±0.133	203.187	209.774±0.354	201.819±0.462	1.944±0.090	0.824±0.013	0.612±0.055	N.D.	174.899±0.733	200.310±9.308
16	128.107±0.021	130.495±0.081	124.915±0.133	203.187±0.410	209.774±0.354	201.819±0.462	0.612±0.073	1.040±0.144	34.582±0.840	138.537±0.825	209.735±0.355	186.843±1.571
24	128.107±0.021	130.495±0.081	124.915±0.133	203.187±0.410	209.774±0.354	201.819±0.462	1.503±0.492	60.205±0.333	68.734±1.066	203.035±0.457	209.382±0.937	168.567±3.687
40	128.711±0.363	130.495±0.081	124.915±0.133	209.869±0.034	209.774±0.354	201.819±0.462	60.185±0.365	115.217±0.429	76.847±7.216	209.807±0.395	207.102±0.886	172.604±5.341
56	128.711±0.363	130.495±0.081	98.081±9.380	209.869±0.034	209.774±0.354	211.415±5.473	115.880±0.697	121.879±0.167	58.026±9.197	209.718±0.252	205.348±0.545	143.593±11.555
72	128.711±0.363	130.495±0.081	131.771±0.252	209.869±0.034	209.774±0.354	211.415±5.473	116.754±0.205	117.919±0.146	116.420±0.333	209.828±0.896	204.682±0.279	210.125±0.330
96	128.711±0.363	130.495±0.081	131.771±0.252	209.869±0.034	209.774±0.354	211.415±5.473	120.925±0.267	122.607±0.449	131.567±0.098	205.051±0.408	197.782±0.126	210.306±0.370
120	128.711±0.363	130.495±0.081	131.771±0.252	209.869±0.034	209.774±0.354	211.415±5.473	123.135±0.258	121.896±0.169	129.289±0.148	205.595±0.638	197.072±0.701	210.461±0.074
144	128.711±0.363	130.495±0.081	131.706±2.341	209.869±0.034	209.774±0.354	211.415±5.473	126.487±0.379	122.311±0.313	126.416±0.275	203.383±1.210	197.072±1.221	211.165±1.183
168	128.711±0.363	130.495±0.081	131.706	209.869±0.034	209.774±0.354	209.251±0.240	125.757±0.463	117.361±0.441	130.099±0.132	204.450±0.750	195.158±0.639	207.310±0.499

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณ โลหะหนักที่ถูกดูดซับในอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

ระยะเวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (มก./ก.)					
	นิกเกิล			โครเมียม		
	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่
0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	6.264±0.001	6.400±0.008	6.046±0.001	10.159±0.040	10.489	9.666±0.046
8	6.308±0.005	6.484±0.001	6.215±0.003	10.159	1.744±0.037	0.075±0.465
16	6.375±0.004	6.473±0.007	4.517±0.042	3.232±0.041	0.002±0.018	0.749±0.079
24	6.330±0.025	3.514±0.017	2.809±0.053	0.008±0.023	0.020±0.047	1.663±0.184
40	3.426±0.018	0.764±0.021	2.403±0.361	0.003±0.020	0.134±0.044	1.461±0.267
56	0.642±0.035	0.431±0.008	2.003±0.460	0.008±0.013	0.221±0.027	3.384±0.578
72	0.598±0.010	0.629±0.007	0.768±0.017	0.002±0.045	0.255±0.014	0.065±0.017
96	0.389±0.013	0.394±0.022	0.010±0.005	0.241±0.020	0.600±0.006	0.055±0.018
120	0.279±0.013	0.430±0.008	0.124±0.007	0.214±0.032	0.635±0.035	0.048±0.004
144	0.111±0.019	0.409±0.016	0.264±0.014	0.324±0.061	0.635±0.061	0.044±0.059
168	0.148±0.023	0.657±0.022	0.080±0.007	0.271±0.038	0.731±0.032	0.097±0.025

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)
- ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมในอัตราการไหลที่ต่างกัน

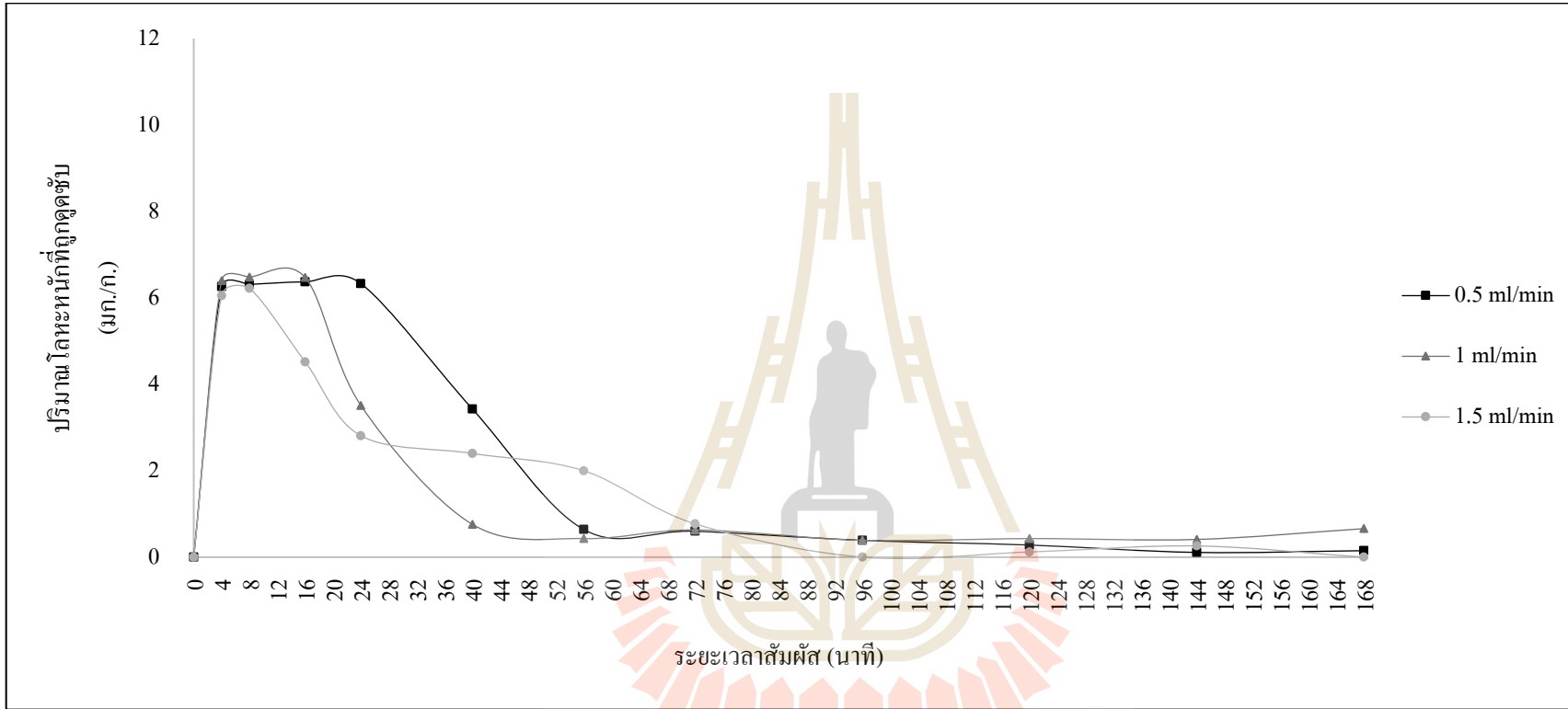
เวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิล (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียม (ร้อยละ)		
	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่
0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	97.80±0.020	98.08±0.119	96.81±0.020	>99.99	>99.99	95.79±0.458
8	98.48±0.071	99.37±0.010	99.50±0.044	>99.99	16.63±0.350	2.28±1.621
16	99.52±0.057	99.20±0.111	72.32±0.672	31.82±0.406	0.02±0.169	7.42±0.778
24	98.83±0.384	53.86±0.255	44.98±0.853	0.11±0.198	0.29±0.291	16.48±1.827
40	53.24±0.283	11.71±0.329	38.48±5.777	0.02±0.034	1.27±0.423	14.48±2.646

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิเกิลและโครเมียมในอัตราการไหลที่ต่างกัน
(ต่อ)

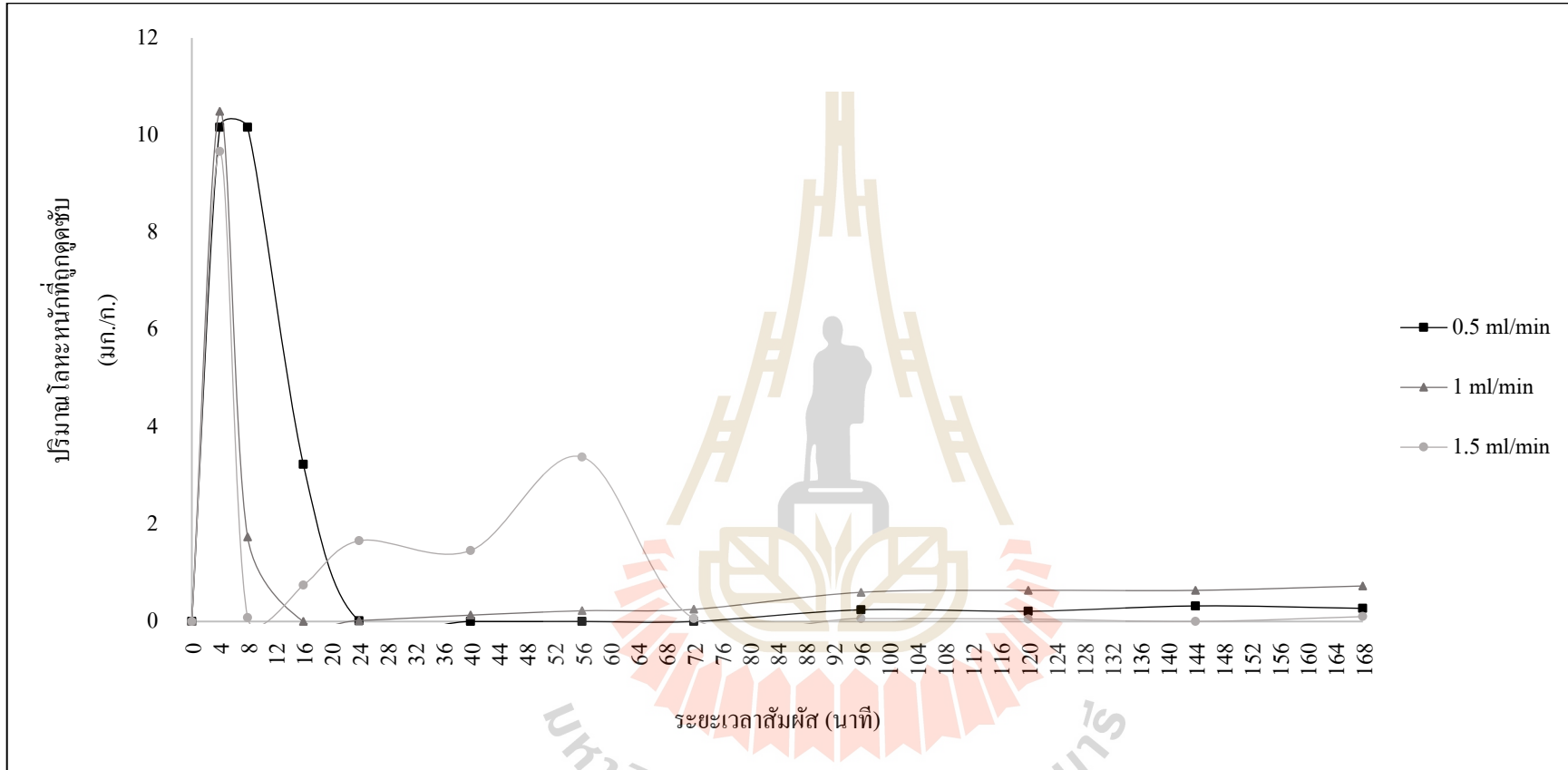
เวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการบำบัดนิเกิล (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียม (ร้อยละ)		
	0.5 มล./นาที่	1มล./นาที่	1.5 มล./นาที่	0.5 มล./นาที่	1 มล./นาที่	1.5 มล./นาที่
56	9.97±0.542	6.60±0.128	40.84±9.377	0.02±0.031	2.11±0.260	32.04±5.469
72	9.29±0.159	9.64±0.112	11.65±0.253	0.14±0.272	2.43±0.133	0.61±0.156
96	6.05±0.207	6.05±0.344	0.08±0.131	2.30±0.194	5.72±0.060	0.52±0.175
120	4.33±0.200	6.59±0.130	1.88±0.113	2.04±0.304	6.06±0.334	0.45±0.035
144	1.73±0.295	6.27±0.240	2.69±2.338	3.09±0.577	6.06±0.582	0.12±0.560
168	2.30±0.360	10.07±0.338	1.22±0.100	2.58±0.358	6.697±0.305	0.93±0.239

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)
- ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ใน
กรณีที่มีบางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย





ภาพที่ 4.10 ปริมาณ นิกเกิลที่ถูกดูดซับที่อัตราการไหลแตกต่างกัน



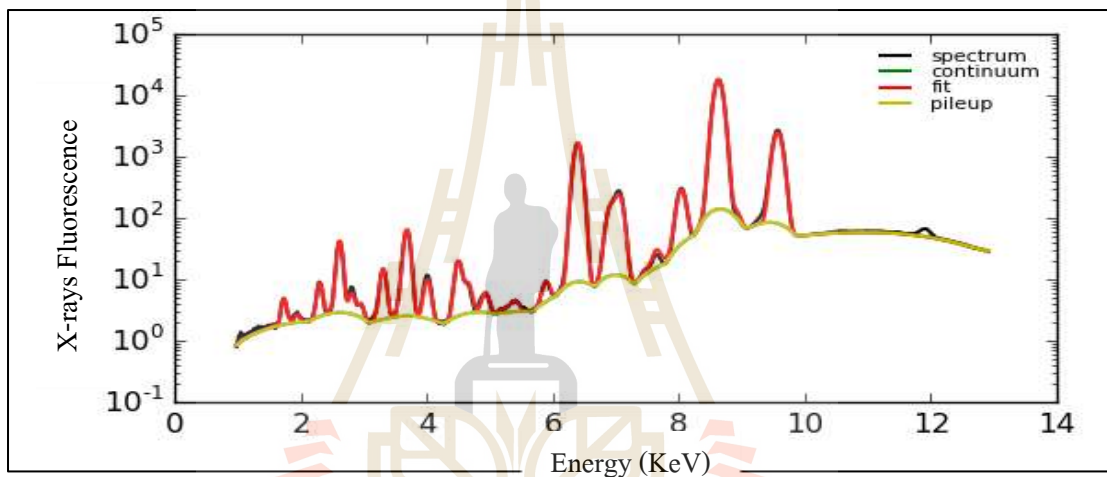
ภาพที่ 4.11 ปริมาณ โครเมียมที่ถูกดูดซับที่อัตราการไหลแตกต่างกัน

ผลการศึกษาข้างต้นพบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบที่เหมาะสมคือ 0.5 มิลลิลิตร ต่อนาที เมื่อเทียบกับอัตราการไหลที่ 1 และ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที มีระยะเวลาในการกักเก็บเท่ากับ 57 นาที ซึ่งระบบสามารถบำบัดนิกเกิลและโครเมียมได้ระยะเวลานานกว่าที่อัตราการไหลอื่น ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีส่วนทำให้การใช้ถ่านกัมมันต์ในระบบลดลง โดยไม่ต้องเปลี่ยนถ่านกัมมันต์บ่อยครั้ง ดังนั้นความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง (Vinodhini and Nilanjana, 2010) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของคอลัมน์และปริมาณถ่านกัมมันต์ (Gupta et al., 2012) ขณะเดียวกันเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการบำบัดโลหะหนักจากระบบที่ใช้อัตราการไหลที่เหมาะสม 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที มาเปรียบเทียบกับชุดองค์ประกอบกับถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ยังไม่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก ด้วยแสงซินโครตรอน เพื่อให้เห็นถึงค่า X-rays Fluorescence counts ของนิกเกิลและโครเมียมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียขุบโลหะแล้ว ผลการศึกษาวិเคราะห์พบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ยังไม่ผ่านการดูดซับไม่พบค่า X-rays Fluorescence counts ของทั้งนิกเกิลและโครเมียม และถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ผ่านการดูดซับพบมีค่า X-rays Fluorescence counts ของนิกเกิลและโครเมียมเท่ากับ 36,845 และ 124,859 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.12) ซึ่งค่า X-rays Fluorescence counts ของตัวอย่างที่ทำการศึกษาได้จากการใช้รังสีเอกซ์กระตุ้นให้อิเล็กตรอนชั้นในสุดของธาตุหลุดออก เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นหลุดออก อะตอมของธาตุจะพยายามกลับสู่สภาวะปกติ ซึ่งจะเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกด้วยอิเล็กตรอนชั้นนอก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของการเรืองรังสีเอกซ์ โดยการศึกษานี้ทำการศึกษาสเปกตรัมของธาตุ ผลการศึกษาจะปรากฏเป็นพีคขึ้น (ภาพที่ 4.12-4.13) ซึ่งเป็นแนวโน้มของปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างที่ทำการศึกษา ทั้งนี้พบว่าแสงซินโครตรอนสามารถแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของนิกเกิลและโครเมียมที่อยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ (ภาพที่ 4.14-4.15) โดยสังเกตได้ว่าจุดที่มีสีแดงหรือส้มมีแนวโน้มของปริมาณนิกเกิลและโครเมียมสูง และลดลงตามลำดับเฉดสีจนถึงสีน้ำเงิน จากผลการศึกษาจึงพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียขุบโลหะได้จริง โดยผลการศึกษาดังกล่าวเป็นส่วนสนับสนุนผลการศึกษาการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียขุบโลหะ

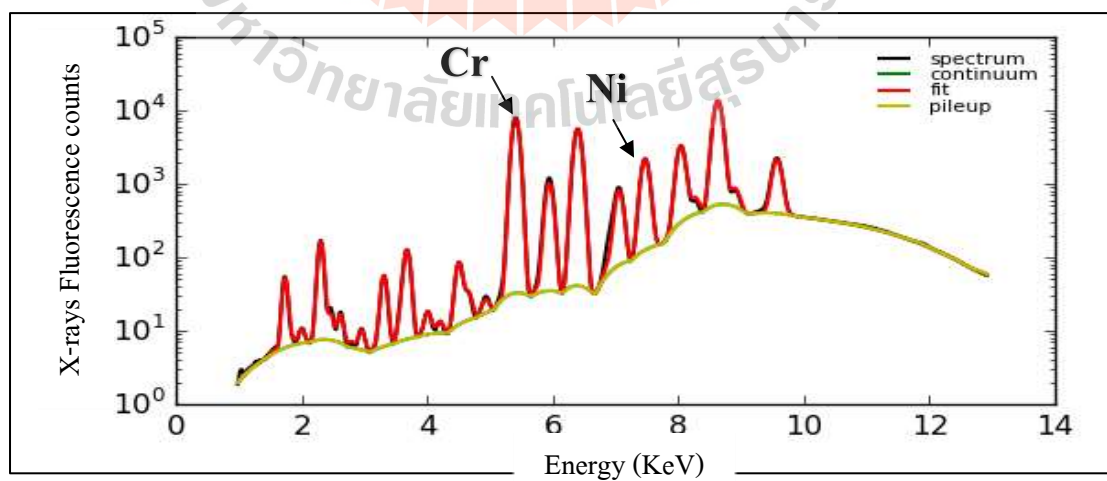
ตารางที่ 4.12 ธาตุองค์ประกอบ

ตัวอย่าง	X-rays Fluorescence counts	
	นิกเกิล	โครเมียม
ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์	N.D.	N.D.
ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักด้วยระบบเพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่	36,845	124,859

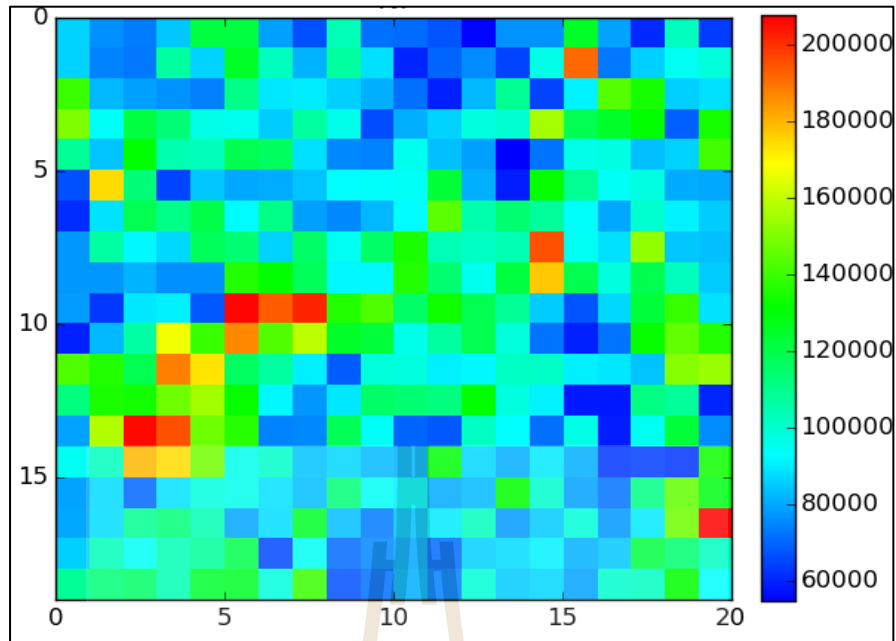
หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง วิเคราะห์ไม่พบ



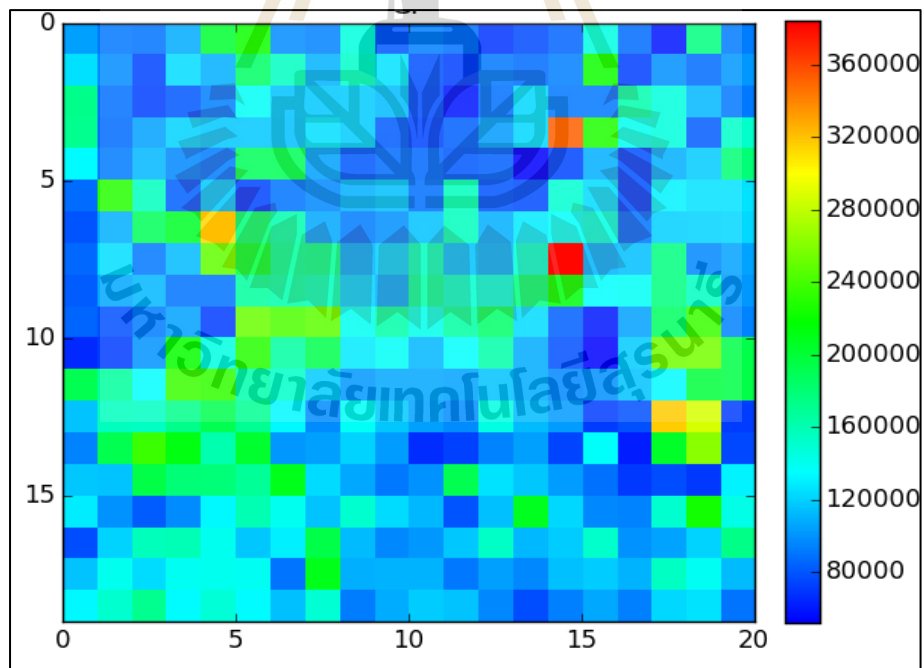
ภาพที่ 4.12 ค่า X-rays Fluorescence counts ของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์



ภาพที่ 4.13 ค่า X-rays Fluorescence counts ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักด้วยระบบเพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่ที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.14 ค่า X-rays Fluorescence counts แต่ละจุดของนิกเกิลจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ
โลหะหนักด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.15 ค่า X-rays Fluorescence counts แต่ละจุดของโครเมียมจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ
โลหะหนักด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

4.5.2 ผลการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่

ดำเนินการโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบที่เหมาะสมจากการศึกษาข้างต้นคือ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลด้วยระบบแพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99.99 ในระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 4, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงแรก โดยไม่พบนิกเกิลในน้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัด ทั้งนี้หลังจากระยะเวลาดังกล่าวประสิทธิภาพเริ่มลดลง และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 99.99 ในระยะเวลาสัมผัสที่ 4 และ 8 ชั่วโมง และประสิทธิภาพเริ่มลดลงหลังจากเวลาดังกล่าว (ตารางที่ 4.13) โดยน้ำเสียขุบโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโครเมียมเท่ากับ 41.115 และ 151.070 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าระบบสามารถบำบัดนิกเกิลและโครเมียมได้สูงสุดมากกว่าร้อยละ 90.00 เหมือนกัน (ตารางที่ 4.14)

ตารางที่ 4.13 ปริมาณนิกเกิลและโครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์

ระยะเวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	นิกเกิล (มก./ก.)			โครเมียม (มก./ก.)		
	คอลัมน์ 1	คอลัมน์ 2	ระบบ*	คอลัมน์ 1	คอลัมน์ 2	ระบบ*
0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	1.287±0.053	0.769±0.001	2.056	7.005±0.016	0.549±0.016	7.554
8	2.023±0.004	0.037±0.010	2.060	1.733±0.524	5.826±0.528	7.554
16	1.903±0.003	0.153±0.003	2.060	1.960±0.062	5.515±0.069	7.474±0.011
24	2.056	0.153	2.060	1.921±0.046	3.217±0.023	5.163±0.013
40	1.989±0.007	0.053±0.013	2.042±0.007	2.121±0.049	2.830±0.072	4.950±0.027
56	1.310±0.011	0.015±0.016	1.325±0.007	2.108±0.042	2.514±0.040	4.622±0.051
72	0.126±0.023	0.062±0.021	0.187±0.016	2.156±0.058	0.798±0.031	2.954±0.033
96	0.100±0.023	0.016±0.017	0.116±0.009	2.084±0.099	0.937±0.071	3.021±0.070
120	0.167±0.013	0.014±0.014	0.140±0.014	1.396±0.075	0.728±0.094	2.124±0.042
144	0.156±0.015	0.012±0.019	0.147±0.019	1.359±0.023	0.750±0.087	2.109±0.092
168	0.155±0.536	0.025±0.008	0.179±0.08	0.298±0.093	1.782±0.121	2.080±0.038

หมายเหตุ * หมายถึง ระบบแพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่

N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

- ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่มีบางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียม

ระยะ เวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	นิกเกิล						โครเมียม					
	คอลัมน์ 1		คอลัมน์ 2		ระบบเพื่คเบคคอลัมน์แบบคู่		คอลัมน์ 1		คอลัมน์ 2		ระบบเพื่คเบคคอลัมน์แบบคู่	
	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
0	41.115±0.259	0.24±0.225	41.115±0.259	N.D.	41.115±0.259	0.24±0.225	151.067±0.244	N.D.	151.067±0.244	N.D.	151.067±0.244	N.D.
4	15.375±0.022	62.61±0.053	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99	10.978±0.324	94.60±0.125	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99
8	0.655±0.088	98.41±0.214	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99	116.408±10.479	22.94±6.936	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99
16	3.052±0.055	92.58±0.135	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99	111.878±1.237	25.94±0.819	1.587±0.219	98.58±0.208	1.587±0.219	98.95±0.145
24	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99	112.649±0.929	25.43±0.615	47.818±0.255	57.60±0.349	47.818±0.255	68.35±0.169
40	1.327±0.135	96.77±0.329	0.271±0.144	78.82±12.665	0.271±0.144	99.34±0.350	108.654±0.984	28.08±0.651	52.063±0.535	52.08±0.860	52.063±0.535	65.54±0.354
56	14.915±0.211	63.72±0.513	14.624±0.136	1.95±2.131	14.624±0.136	64.43±0.332	108.903±0.839	27.91±0.555	58.633±1.026	46.16±0.744	58.633±1.026	61.19±0.679
72	38.596±0.453	6.13±1.103	37.366±0.328	3.18±0.178	37.366±0.328	9.12±0.799	107.957±1.166	28.54±0.772	91.991±0.669	14.79±0.440	91.991±0.669	39.11±0.443
96	39.112±0.465	4.87±1.131	38.799±0.182	0.79±0.838	38.799±0.182	5.63±0.442	109.390±1.978	27.59±1.310	90.659±1.405	17.12±1.100	90.659±1.405	39.99±0.930
120	37.784±0.266	8.10±0.646	38.322±0.277	0.74±0.709	38.322±0.277	6.79±0.673	123.151±1.507	18.48±0.997	108.593±0.838	11.80±1.403	108.593±0.838	28.12±0.555
144	37.000±0.304	7.58±0.739	38.166±0.378	0.64±0.992	38.166±0.378	7.17±0.920	123.894±0.467	17.99±0.309	108.900±1.840	12.10±1.406	108.900±1.840	27.92±1.218
168	38.020±0.221	7.53±0.536	37.528±0.160	1.26±0.366	37.528±0.160	8.72±0.390	145.110±1.853	3.95±1.226	109.473±0.754	24.55±1.373	109.473±0.754	27.54±0.499

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD)

ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

4.5.3 ผลการศึกษาสารสกัดที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืน

นำถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนโลหะ ปริมาณ 3 กรัม มาสกัดด้วยสารสกัด โดยเลือกใช้สารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (0.1 M HNO₃, 1 M HNO₃, 0.1 M NaOH) น้ำเสียชุมชนโลหะที่ใช้ศึกษาถูกปรับให้มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 โดยมีความเข้มข้นของ นิกเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนโลหะเริ่มต้นเท่ากับ 136.094 และ 211.641 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.1, 1 โมลาร์ และสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สามารถนำนิกเกิลกลับคืนได้ร้อยละ 90.64, 96.50 และ 2.17 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำนิกเกิลกลับคืนได้ปริมาณ 4.127, 4.382 และ 3.074 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และนำโครเมียมกลับคืนได้ร้อยละ 28.50, 99.32 และ 4.52 ตามลำดับ โดยโครเมียมถูกนำ กลับคืนได้ปริมาณ 3.878, 7.028 และ 3.638 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15) (ภาคผนวก จ.)

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพการนำโลหะหนักกลับคืนด้วยกรดต่าง

โลหะหนัก	สารละลายที่ใช้สกัด โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการนำโลหะ	ปริมาณโลหะหนัก
		หนักกลับคืน (ร้อยละ)	ที่ถูกลำกลับคืน (มก./ก.)
นิกเกิล	0.1 M HNO ₃	90.64±0.049	4.127
	1M HNO ₃	96.50±0.133	4.382
	0.1M NaOH	2.17±0.151	3.074
โครเมียม	0.1 M HNO ₃	28.50±0.331	3.878
	1M HNO ₃	99.32±0.052	7.028
	0.1 M NaOH	4.52±0.090	3.638

หมายเหตุ - ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารละลายกรดไนตริก สามารถนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนได้มีประสิทธิภาพมากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยสารละลายกรดไนตริกมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นสารละลายกรดไนตริกมีความเหมาะสมในการนำโลหะหนักกลับคืน (Singh and Lee, 2016) และจากงานวิจัยของ Gupta et al. (2012) และ Sarkar

(2002) พบว่ากรดไนตริกสามารถนำ निकิลและ โครเมียมกลับคืนจากถ่านกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 98.00 และ 70.00 ตามลำดับ เนื่องด้วยการนำ โลหะหนักกลับคืนจากถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งถ่านกัมมันต์อยู่ในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูงจะทำให้เกิดการละลายประจุบวกของโลหะหนักออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีประจุลบด้วยแรงดึงดูด เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันระหว่างโปรตรอน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายกับไอออนบวกของโลหะหนักในการแย่งจับที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้ไอออนของโลหะหนักหลุดออก (Lata et al., 2015; Zhou and Hynes, 2011) จากการศึกษาข้างต้น निकิลที่อยู่ในน้ำเสียชุบโลหะอาจจะอยู่ในรูป Ni^{2+} (Gonsalvesh et al., 2016) ดังนั้น निकิลที่ถูกดึงออกจากผิวของถ่านกัมมันต์อาจจะ เป็น Ni^{2+} และ โครเมียมที่ละลายอยู่ในน้ำเสียชุบโลหะอาจจะอยู่ในรูป $Cr(OH)^{2+}$ หรือ $Cr(OH)_2^+$ ซึ่งถือว่า ไอออนทั้งสองเป็นไอออนบวกของโครเมียมที่อาจจะถูกนำกลับคืน (Gupta et al., 2013) เนื่องจากน้ำเสียชุบโลหะถูกปรับให้มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ pH 5 และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการนำโลหะหนักกลับคืนแล้วสามารถนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักได้อีกครั้ง (Gupta et al., 2012) การศึกษาการนำโลหะหนักกลับคืน พบว่าสารละลายที่เกิดจากการสกัดเอาโลหะหนักกลับคืนจากถ่านกัมมันต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ เนื่องจากสามารถผลิต निकิลและ โครเมียมจำหน่ายได้ ซึ่งวิธีการผลิตมีหลายวิธี โดยจากการศึกษาพบการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดกระบวนการตกตะกอน ซึ่งตะกอนเกิดจากไอออนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (OH^-) จับกับไอออนของ निकิล (Ni^{2+}) เกิดเป็นตะกอน ($Ni(OH)_2(s)$) มีสถานะเป็นของแข็ง และกระบวนการยังก่อให้เกิดสารละลายที่มีไอออนของโครเมียม (CrO_4^{2-}) ซึ่งสามารถนำ निकิลและ โครเมียมไปจำหน่ายได้ในอัตรา 30 และ 9.8 US/kg ตามลำดับ ดังนั้นการศึกษาวิจัยในอนาคตอาจทำการศึกษาการผลิต निकิลและ โครเมียมเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ (Machado, Soares, and Soares, 2011)

4.5.4 ผลการบำบัด निकิลและโครเมียมด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ชำ

การศึกษการบำบัด निकิลและโครเมียมในระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ในขั้นตอนนี้ใช้สภาวะเหมือนกับข้อ 4.5.2 โดยนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับจากข้อดังกล่าวมาใช้ซ้ำ และทำการดึงเอาโลหะหนักกลับคืนด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากการศึกษาข้อข้างต้น ซึ่งพบว่าคอลัมน์ที่หนึ่งสามารถนำ निकิลและโครเมียมกลับคืนได้ร้อยละ 71.82 และ 94.19 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่สองสามารถนำ निकิลและโครเมียมกลับคืนได้ร้อยละ 85.47 และ 93.26 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.16) โดยน้ำเสียชุบโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้นของ निकิลและโครเมียมเท่ากับ 41.115 และ 151.070 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด निकิลและ

โครเมียมด้วยระบบแพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่ มีประสิทธิภาพสูงสุด ในระยะเวลาสัมพัทธ์ 24 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้ปริมาณ 2.214 และ 7.135 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.17) โดยพบว่าประสิทธิภาพร้อยละ 99.43 และ 93.97 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.18)

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลและโครเมียมหลังการนำโลหะหนักกลับคืน

คอลัมน์	นิกเกิล		โครเมียม	
	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่นำกลับคืน (มก./ล.)	การนำโลหะหนักกลับคืน (ร้อยละ)	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่นำกลับคืน (มก./ล.)	การนำโลหะหนักกลับคืน (ร้อยละ)
1	3.331±0.032	71.82±1.271	6.874±0.092	94.19±0.202
2	3.352±0.050	85.47±1.592	6.824±0.040	93.26±0.632

ตารางที่ 4.17 ปริมาณนิกเกิลและโครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ซ้ำ

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	นิกเกิล (มก./ก.)			โครเมียม (มก./ก.)		
	คอลัมน์ 1	คอลัมน์ 2	ระบบแพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่	คอลัมน์ 1	คอลัมน์ 2	ระบบแพ็คเบคคอลลัมน์แบบคู่
0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.040±0.012
4	2.227	0.430	1.798±0.004	3.667±0.041	3.264±0.046	6.931±0.009
8	1.634±0.004	0.408±0.006	2.042±0.004	0.285±0.074	6.850±0.073	7.135±0.012
16	1.373±0.004	0.627±0.003	2.000±0.003	0.495±0.045	6.631±0.013	7.121±0.013
24	1.177±0.021	1.017±0.001	2.214±0.001	0.095±0.049	3.165±0.011	3.260±0.043
40	0.865±0.018	1.052±0.016	1.916±0.003	0.290±0.026	2.407±0.021	2.697±0.007
56	0.391±0.011	0.744±0.002	1.134±0.010	0.306±0.027	1.120±0.060	1.426±0.052

ตารางที่ 4.17 ปริมาณนิกเกิลและ โครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ซ้ำ (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	นิกเกิล (มก./ก.)			โครเมียม (มก./ก.)		
	คอลัมน์ 1	คอลัมน์ 2	ระบบแพ็ค	คอลัมน์ 1	คอลัมน์ 2	ระบบแพ็ค
			เบดคอลัมน์ แบบคู่			เบดคอลัมน์ แบบคู่
72	0.466±0.020	0.685±0.021	1.151±0.009	0.822±0.087	0.803±0.079	1.625±0.026
96	0.299±0.003	0.854±0.013	1.154±0.013	0.242±0.044	0.540±0.016	0.782±0.037
120	0.283±0.017	0.101±0.005	0.384±0.015	0.162±0.074	0.589±0.096	0.752±0.077
144	0.280±0.016	0.108±0.017	0.388±0.009	0.188±0.076	0.529±0.062	0.717±0.084
168	0.275±0.016	0.114±0.018	0.390±0.026	0.256±0.076	N.D.	0.210±0.039

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

- ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย



ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ซ้ำ

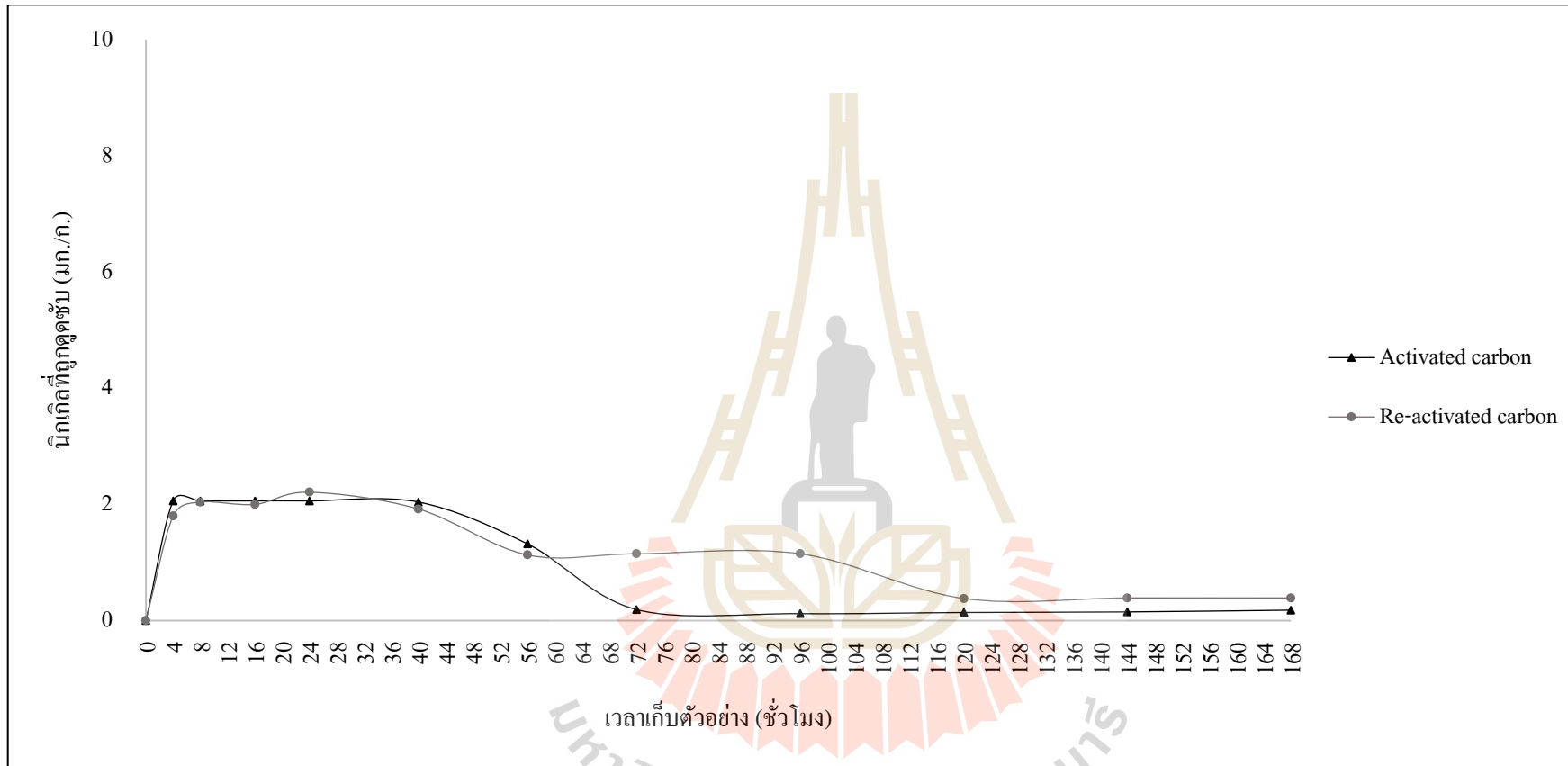
ระยะ เวลาเก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	นิกเกิล						โครเมียม					
	คอลัมน์ 1		คอลัมน์ 2		ระบบเพื่อบดคอลัมน์แบบตู้		คอลัมน์ 1		คอลัมน์ 2		ระบบเพื่อบดคอลัมน์แบบตู้	
	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
0	44.543±0.234	N.D.	44.543±0.234	N.D.	44.543±0.234	N.D.	151.067±0.244	N.D.	151.067±0.244	N.D.	151.067±0.244	N.D.
4	N.D.	>99.99	N.D.	>99.99	8.587±0.074	80.72±0.166	78.529±0.813	61.35±0.536	13.251±0.172	83.12±0.357	13.251±0.172	93.48±0.113
8	11.865±0.090	73.36±0.202	3.709±0.082	68.74±0.745	3.709±0.082	91.67±0.183	146.165±1.487	3.75±0.979	9.156±0.237	93.74±0.161	9.158±0.237	93.97±0.156
16	17.086±0.083	61.64±0.186	4.538±0.057	73.40±0.240	4.538±0.057	89.81±0.127	141.968±0.904	6.52±0.595	9.446±0.253	93.35±0.168	9.446±0.253	93.78±0.167
24	21.006±0.427	52.84±0.958	0.253±0.017	98.80±0.106	0.253±0.017	99.43±0.039	149.973±0.989	1.25±0.651	86.665±0.866	42.21±0.215	86.665±0.866	42.93±0.570
40	27.249±0.360	38.80±0.808	6.217±0.061	77.19±0.189	6.217±0.061	86.04±0.136	146.058±0.520	3.83±0.342	97.922±0.146	32.96±0.176	97.922±0.146	35.52±0.096
56	36.726±0.219	17.55±0.492	21.856±0.206	40.50±0.225	21.856±0.206	50.93±0.463	145.740±0.532	4.03±0.350	123.341±1.037	15.37±0.798	123.341±1.037	18.78±0.683
72	35.215±0.399	20.90±0.897	21.524±0.188	38.88±0.818	21.524±0.188	51.68±0.423	135.425±1.745	10.83±1.149	119.370±0.513	11.85±1.017	119.370±0.513	21.40±0.338
96	38.555±0.059	13.44±0.132	21.464±0.266	44.33±0.663	21.464±0.266	51.81±0.598	147.030±0.874	3.19±0.575	136.237±0.735	7.34±0.201	136.237±0.735	10.29±0.484
120	38.878±0.346	12.71±0.777	36.862±0.309	5.19±0.247	36.862±0.309	17.24±0.694	148.624±1.477	2.14±0.973	136.831±1.535	7.93±1.246	136.831±1.535	9.90±1.011
144	38.938±0.319	12.58±0.716	36.775±0.170	5.56±0.828	36.775±0.170	17.44±0.382	148.100±1.524	2.48±1.003	137.527±1.683	7.14±0.824	137.527±1.683	9.44±1.108
168	39.033±0.323	12.37±0.725	36.747±0.513	5.86±0.904	36.747±0.513	17.50±1.152	146.748±1.526	3.37±1.005	147.669±0.772	0.11±0.524	147.669±0.772	2.76±0.508

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่าขีดจำกัด (<0.01 มก./ล.)

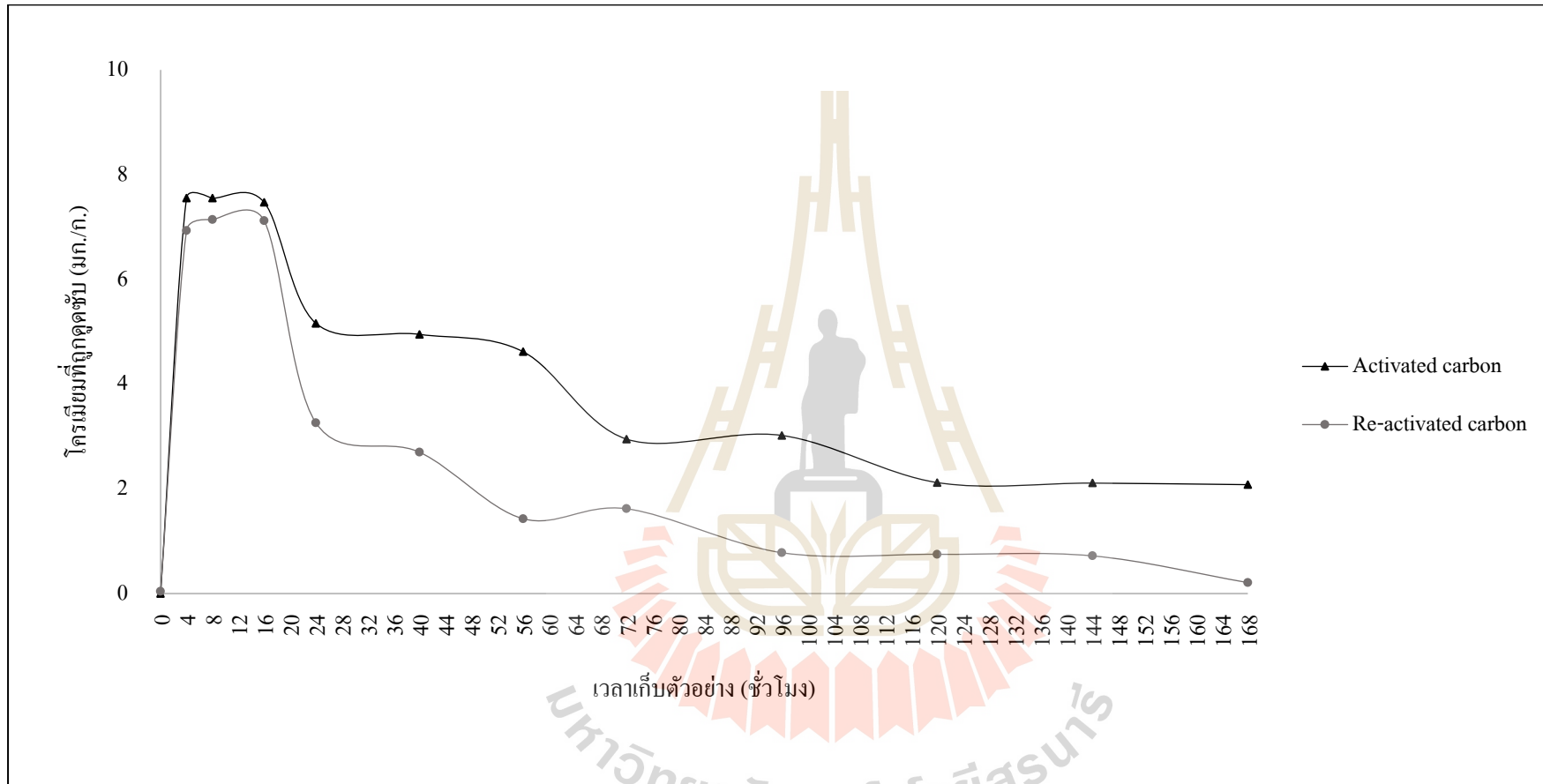
- ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD)

ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

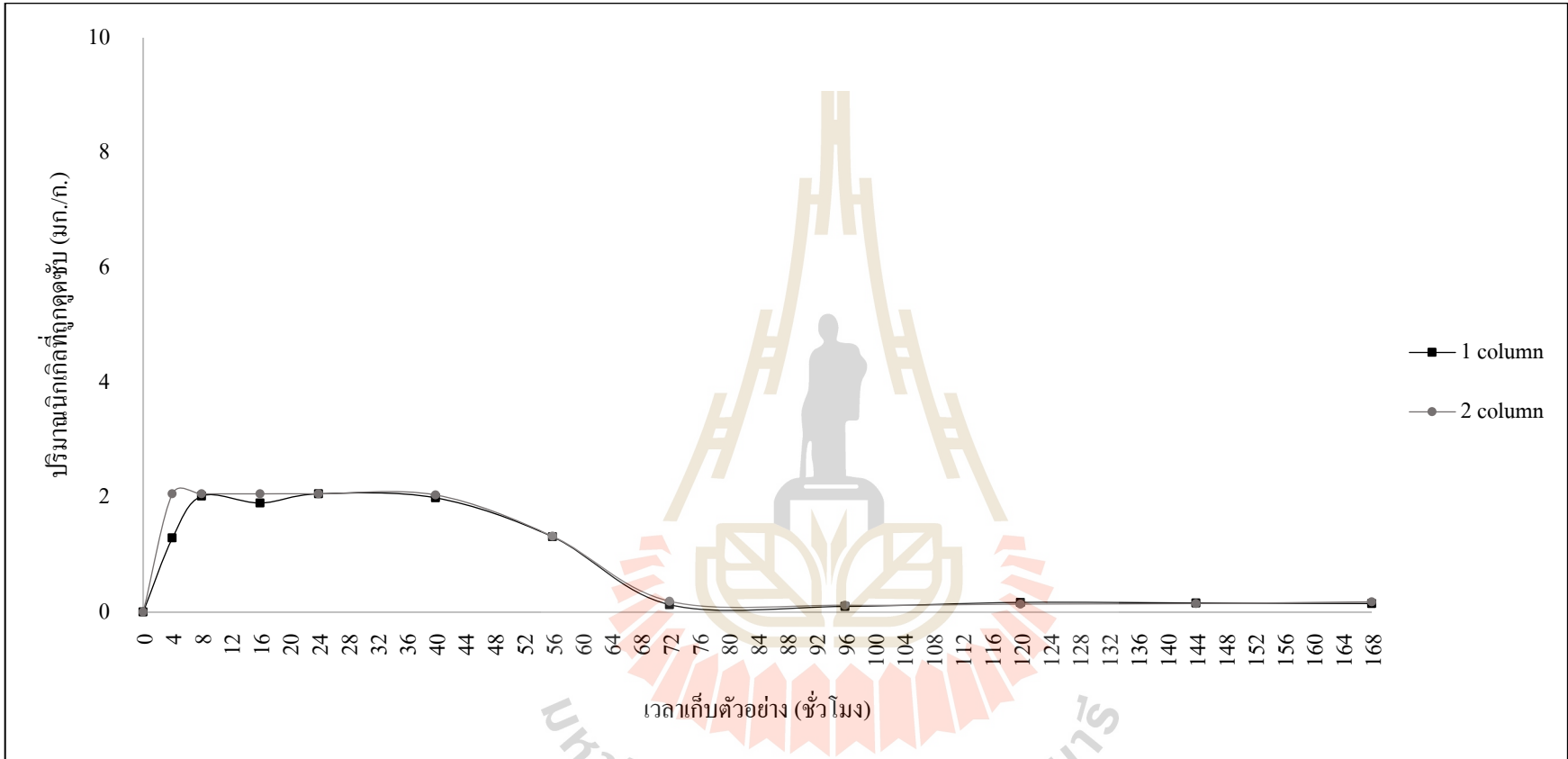
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ ของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับครั้งแรกและการใช้ซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ซ้ำ มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ครั้งแรก แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับยังมากกว่าร้อยละ 80.00 (ภาพที่ 4.16 และ 4.17) แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการนำโลหะหนักกลับคืนสามารถนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักได้อีกครั้งเนื่องจากกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ สามารถดึงเอาโลหะหนักออกจากถ่านกัมมันต์จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นแต่อาจจะน้อยกว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับในครั้งแรก ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีแนวโน้มสามารถนำมาใช้ในการดูดซับซ้ำได้หลายครั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์และสารละลายที่นำมาสกัด ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมระหว่างการใช้ระบบหนึ่งคอลัมน์กับสองคอลัมน์ได้ ซึ่งเมื่อทำการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมแบบสองคอลัมน์พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.18, ภาพที่ 4.18 และ 4.19) (Cecen et al., 2012) และการเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุล และการใช้ระบบคอลัมน์แบบคู่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น หากทำการศึกษาโดยเดินระบบบำบัดแบบไม่ต่อเนื่อง อาจทำให้ไม่ทราบช่วงเวลาที่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักสูงสุด ทำให้มีแนวโน้มในการเลือกใช้เวลาบำบัดของระบบที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรม ซึ่งที่กล่าวมาเป็นเหตุผลของงานวิจัยในครั้งนี้ในการเลือกใช้การเดินระบบเป็นแบบต่อเนื่องด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่



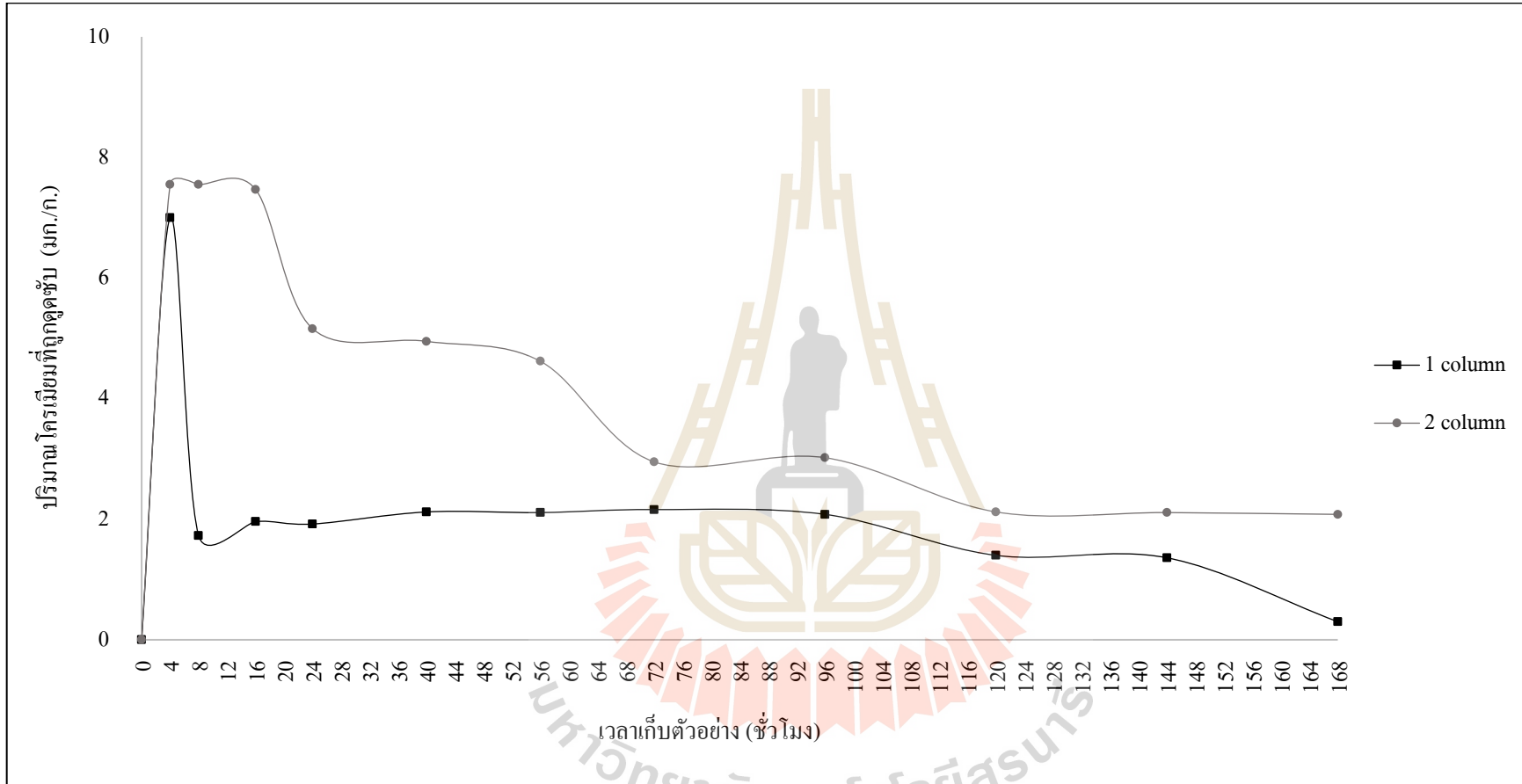
ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่นำนิกเกิลหนักกลับคืนแล้ว



ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบปริมาณ โครเมียมที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่นำ โครเมียมกลับคืนแล้ว



ภาพที่ 4.18 ปริมาณนิกเกิดที่ถูกลดซับ



ภาพที่ 4.19 ปริมาณ โครโรคลอโรฟิลล์ที่ถูกดูดซับ

4.6 การศึกษาคุณภาพของน้ำเสียชุมชนและน้ำทิ้ง

การศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียชุมชนและน้ำทิ้งก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบเพื่อคัดแยกคอลลอยด์แบบคูล์ ได้ศึกษาวิเคราะห์ค่าสี ค่าความขุ่น ค่าความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์ค่าสีของน้ำเสียก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบพบว่ามีค่าเท่ากับ 487 และ 338 ADMI ตามลำดับ ค่าความขุ่นก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบคือ 26.20 และ 0.38 NTU ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามียูนิทก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบ 29.40 และ 24.50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าความเป็นกรดด่างของน้ำเสียก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบคือ 5.00 และ 6.65 เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของน้ำเสียก่อนเข้าระบบกับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม พบว่าค่าสี และค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเกินมาตรฐานกำหนด และเมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของน้ำทิ้งหลังออกจากระบบกับค่ามาตรฐานพบว่าค่าสียังมีค่าเกินที่มาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องมีการบำบัดอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม (ตารางที่ 4.19) การศึกษาคูณลักษณะของน้ำทิ้งในครั้งนี้ตามมาตรฐานไม่ได้กำหนดค่าความขุ่น แต่ทำการวิเคราะห์เนื่องจากค่าความขุ่นมีความเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของโลหะหนักและใช้พิจารณาเบื้องต้นว่าน้ำเสียมีแนวโน้มของการปนเปื้อนโลหะหนัก หากทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าน้ำเสียมีค่าความขุ่นแสดงว่าน้ำเสียอาจมีโลหะหนักปนเปื้อน ซึ่งค่าความขุ่นที่วัดได้นั้นอาจเกิดจากตะกอนของโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำ (Guertin et al., 2005)

ตารางที่ 4.19 คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชนและน้ำทิ้งก่อนและหลังออกจากระบบเพื่อคัดแยกคอลลอยด์แบบคูล์

พารามิเตอร์	น้ำเสียชุมชนและน้ำทิ้ง		มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม* อุตสาหกรรม*
	ก่อนเข้าระบบ	หลังออกจากระบบ	
สี (ADMI)	487	338	ไม่เกิน 300 ADMI
ความขุ่น	26.20	0.38	-
อุณหภูมิ (°C)	29.40	24.50	ไม่เกิน 40
ค่าความเป็นกรดด่าง	5.00	6.65	5.50-9.00

หมายเหตุ * แหล่งที่มาจาก ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2559 ดัชนีพีเอ็นราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 133 ตอนพิเศษ 129 ง ลงวันที่ 6 มิถุนายน 2559

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยการนำคาร์บอนแบล็คจากยางรถยนต์มาพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ในการดูดซับนิเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนโดยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ เพื่อให้ผลการศึกษาเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และเพื่อเป็นการพัฒนางานวิจัยในอนาคต ซึ่งสรุปผลการศึกษาวิจัยและมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาการบำบัดนิเกิลและโครเมียมในน้ำเสียชุมชนโดยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่ โดยการใช้ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ พบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดนิเกิลและโครเมียม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของโลหะหนัก และขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ

5.1.1 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เป็นส่วนสำคัญในการทดสอบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์เป็นถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด ซึ่งกำหนดคุณสมบัติไว้สองคุณสมบัติคือ ค่าการดูดซับไอโอดีนและความหนาแน่นปรากฏ การศึกษานี้ดำเนินการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยคุณสมบัติทางกายภาพคือ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ศึกษาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) และลักษณะพื้นผิว (Texture) ศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์ความพรุน (BET) จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีพื้นผิวเป็นระเบียบ มีรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน 149.73 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.05 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยรูพรุนเป็นประเภทขนาดกลาง (Mesopore) และคุณสมบัติทางเคมีคือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถดูดซับไอโอดีนได้ 1,506.13 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าความหนาแน่นปรากฏ มีค่า 0.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน

กำหนด ดังนั้นการกระตุ้นคาร์บอนแบล็คให้เป็นถ่านกัมมันต์ ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สามารถนำคาร์บอนแบล็คมาเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียได้

5.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียม

ดำเนินการโดยกำหนดค่าความเป็นกรดต่าง ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์กับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ ผลการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที และถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่นๆ โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลและโครเมียมมากกว่าร้อยละ 50.00 และ 99.99 ตามลำดับ ซึ่งถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ดูดซับนิกเกิลและโครเมียมแบบชั้นเดียว (Homogeneous) หรือแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม การศึกษาดำเนินการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม การนำคาร์บอนแบล็คจากยางรถยนต์มาพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์มีส่วนช่วยให้เกิดการใช้ของเสียให้เกิดประโยชน์ ในทางเดียวกันการศึกษาวิจัยนี้ทำการศึกษาสารสกัดที่สามารถนำนิกเกิลและโครเมียมกลับคืนได้ เพื่อลดการใช้ถ่านกัมมันต์ด้วยการใช้ซ้ำ ซึ่งกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ สามารถนำโลหะหนักกลับคืนได้โดยมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90.00 เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายสกัดตัวอื่นๆ และที่ความเข้มข้นต่างกัน ทั้งนี้ยังพบว่าสารละลายที่เกิดจากการนำโลหะหนักกลับคืนอาจจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

5.1.3 การบำบัดนิกเกิลและโครเมียมด้วยระบบแพ็คเบดคอลัมน์แบบคู่

ระบบที่นำมาดำเนินการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียหุบ โลหะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ซึ่งการศึกษาวิจัยเลือกใช้ระบบคอลัมน์ เพื่อให้เหมาะสมกับการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัม น้ำเสียหุบ โลหะถูกปรับให้มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลมากกว่าร้อยละ 99.99 ที่ระยะเวลาสัมผัส 4, 8, 16 และ 24 ชั่วโมง และระบบสามารถบำบัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.99 ในระยะเวลาสัมผัส 4 และ 8 ชั่วโมง โดยระยะเวลาสัมผัสที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียมดังที่กล่าว พบว่าน้ำเสียที่ออกจากระบบไม่พบนิกเกิลและโครเมียม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมแล้วพบว่าความเข้มข้นของนิกเกิลและโครเมียมมีค่าไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด โดยกำหนดไว้คือ ค่าความเข้มข้นของ

นิกเกิดในน้ำทิ้งไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และ โครเมียมเฮกซะวาเลนท์กับ โครเมียมไตรวา-เลนท์ไม่เกิน 0.250 และ 0.750 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ น้ำเสียชุมชนโลหะที่ทำการศึกษาคือเป็น โครเมียมรวม ดังนั้นการใช้ระบบเพื่อกเบตคอลลิมน์แบบคู่ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียชุมชนโลหะจากอุตสาหกรรมด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ มีประสิทธิภาพสูงสุดไม่เกิน 24 และ 8 ชั่วโมง ถ้าหลังจากระยะเวลานี้ อาจต้องทำการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ในระบบ แต่เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายอาจจะฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์หรือนำโลหะหนักกลับคืนจึงจะสามารถนำถ่านกัมมันต์มาใช้บำบัดโลหะหนักในระบบได้อีกครั้งอย่างมีประสิทธิภาพ

5.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับซ้ำของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่นำมาศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซ้ำ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักแล้ว และได้ผ่านการนำเอานิกเกิดและโครเมียมกลับคืนด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ดำเนินการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดนิกเกิดและโครเมียม และทราบถึงแนวโน้มประสิทธิภาพในการบำบัด ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์สามารถนำมาดูดซับซ้ำได้อีกครั้ง เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิดและโครเมียมสูงสุดร้อยละ 99.43 และ 93.97 ที่ระยะเวลา 24 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบคอลลิมน์แบบหนึ่งคอลลิมน์กับสองคอลลิมน์ พบว่าการใช้ระบบแบบสองคอลลิมน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดนิกเกิดและโครเมียมเพิ่มขึ้น

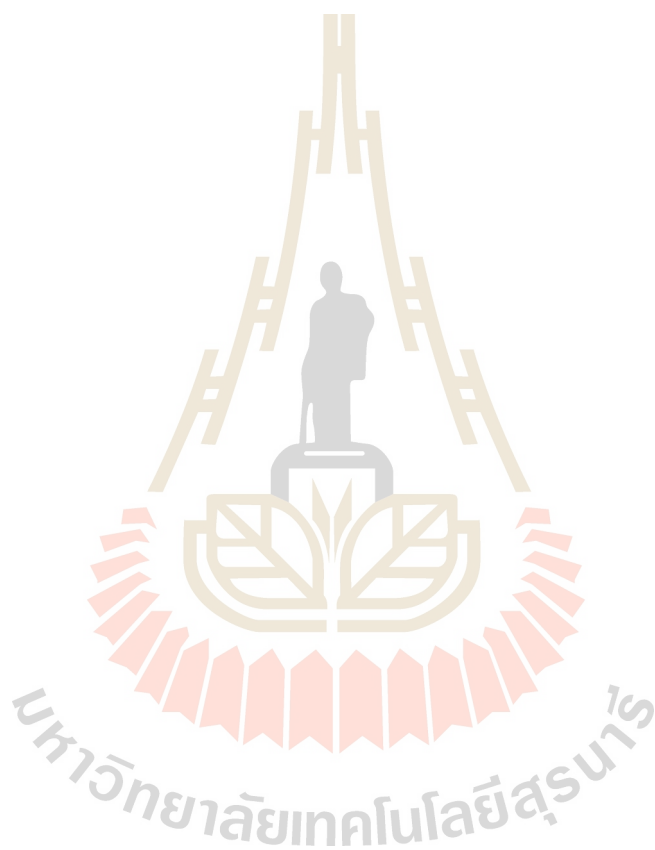
5.2 ข้อเสนอแนะจากการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาการดูดซับและการนำนิกเกิดและโครเมียมกลับคืนจากน้ำเสียชุมชนโลหะด้วยถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ในครั้งนี้พบข้อเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาต่อไป ดังนี้

1. ขั้นตอนการสกัดนิกเกิดและโครเมียมกลับคืน สามารถนำสารละลายหลังการนำโลหะหนักกลับคืนไปศึกษาต่อด้านการผลิตนิกเกิดและโครเมียมในเชิงพาณิชย์ได้
2. ขั้นตอนการศึกษาการบำบัดนิกเกิดและโครเมียมด้วยระบบคอลลิมน์ ขั้นตอนนี้สามารถศึกษาต่อในอนาคตเกี่ยวกับแนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัด หากขนาดของคอลลิมน์ ปริมาณถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียมีปริมาณแตกต่างกัน

3. ขั้นตอนการศึกษาการบำบัดนิเกิลและโครเมียม สามารถศึกษาการบำบัดโลหะหนักชนิดอื่นเพิ่มเติมในอนาคต เช่น คอปเปอร์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

4. นำเสียก่อนและหลังออกจากระบบเพื่อบีบคอลลัมน์แบบคู่พบมีค่าสีเกินมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมกำหนด จำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม





รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2547). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ มอก .900-2547.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2548). หลักปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขาชุบโลหะ
- เกษม แก้วพลาย. (2553). **เคมีทั่วไป 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2542). การบำบัดน้ำเสีย **wastewater treatment**. หจก. สยามสเตชันเนอรี ชีฟพลายส์
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2548). **หลักปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขาชุบโลหะ**.
- ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบาย น้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ.2559 (6 มิถุนายน 2559). **ราชกิจจานุเบกษา**. เล่มที่ 133 ตอนพิเศษ 129 ง. หน้า17
- Abbaszadeh, S., Alwi, S., Webb, C., Ghasemi, N., Muhamad, I. (2016) Treatment of lead-contaminated water using activated carbon adsorbent from locally available papaya peel biowaste. **Journal of Cleaner Production** (118): 210-222.
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Sarzanini, C., and Mentasti, E. (2003). Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances. **Water Research** (37): 1619-1627.
- Acevedo, B. and Barriocanal, C. (2015). Texture and surface chemistry of activated carbons obtained from tyre wastes. **Fuel Processing Technology** (134): 275-283.
- Acosta, R., Fierro, V., Martinez de, Y., Nabarlantz, D., Celzard, A. (2016). Tetracycline adsorption onto activated carbons produced by KOH activation of tyre pyrolysis char. **Chemosphere** (149): 168-176.

- Akcil, A., Veglio, F., Ferella, F., Okudan, MD., and Tuncuk, A. (2015). A review of metal recovery from spent petroleum catalysts and ash. **Waste Management** (45): 420-433.
- Alexandre-Franco, M., Fernandez-Gonzalez, C., Alfaro-Dominguez, M., and Gomez-Serrano, V. (2011).
- Adsorption of cadmium on carbonaceous adsorbents developed from used tire rubber. **Journal of Environmental Management** (92): 2193-2200.
- Amari, T., Themelis, J., and Wernick, K. (1999). Resource recovery from used rubber tires. **Resources Policy** (25): 179-188.
- American Society for Testing and Materials. Standard test method for determination of iodine number of activated carbon. Philadelphia, PA: **ASTM Committee on Standards**, 1986.
- Arup, K. and SenGupta. (2002). Environmental Separation of Heavy metals: Engineering Processes. Boca Raton: **LEWIS PUBLISHERS**.
- Babu, B. R., Bhanu, S. U. and Meera, K. S. (2009). **Waste minimization in electroplating industries: A Review**. Journal of environmental science and health part C, (27): 155-177.
- Baccar, R., Bouzid, J., Feki, M. and Montiel, A. (2009). Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions. **Journal of hazardous materials** (162): 1522-1529.
- Bansal, R. C. and Goyal, M. (2005). **Activated carbon adsorption**. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Bansal, R. C., Donnet, J. B. and Stoeckli, F. (1988). **Activated carbon**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Barakat, M.A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. **Arabian Journal of Chemical** (4): 361-377.
- Beatriz, A., and Carmen, B. (2015). Texture and surface chemistry of activated carbons obtained from tyre wastes. **Fuel Processing Technology** (134): 275-283.
- Bhatnagar, A., and Minocha, A.K. (2010). Biosorption optimization of nickel removal from water using Punica granatum peel waste. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** (76): 544-548.
- Burchell, T. D. (1999). Carbon Materials for Advanced Technologies. Amsterdam, Lausanne, New York, Oxford, Shannon, Singapore and Tokyo: **PERGAMON**.

- Cecen, F. and Aktas, O. (2012). Activated carbon for water and wastewater treatment. **Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr.**
- Charumathi, D. and Das, N. (2012). Packed bed column studies for the removal of synthetic dyes from textile wastewater using immobilized dead *C. tropicalis*. **Desalination** (285): 22-30.
- Chen, J. Y. (2017). **Activated Carbon Fiber and Textiles**. Amsterdam: Elsevier.
- Cussler, E. L. (2008). **Diffusion: mass transfer in fluid system**. (3 rd. ed.). New York: Cambridge.
- Dixon, J. C. (1996). **Tires, Suspension and Handling**. (2 nd. ed.). London: Society of automotive engineers, Inc.
- Donnet, J. B., Bansal, R. C. and Wang, M. J. (1993). **CARBON BLACK**. (2 nd. ed.). New York, Basel, Hong Kong: Marcel Dekker, Inc.
- Durney, L. G. (1984). **Electroplating Engineering Handbook** (4 th. ed.). New York: VAN NOSTRAND REINHOLD.
- Dziunikowski, B. (1989). **ENERGY DISPERSIVE X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS**. New York: Elsevier.
- Edzwald, J. K. (2011). **Water Quality & Treatment. A Handbook on Drinking Water**. (6 th. ed.). New York: McGRAW-HILL.
- Egerton, R. F. (2007). **Physical Principles of Electron Microscopy**. USA: Springer.
- Ferraz, A.I., Tavares, T. and Teixeira, J.A. (2004). Cr (III) removal and recovery from *Saccharomyces cerevisiae*. **Chemical Engineering Journal** (105): 11-20.
- Fu, F., and Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. **Journal of Environmental Management** (92): 407-418.
- Giavarini, C. (1985). Active carbon from scrap tires. **Department of ingegneria chimica, Via Eudossiana Italy: Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.**
- Gonsalvesh, L., Marinov, S. P., Gryglewicz, G., and Yperman, J. (2016). Preparation, characterization and application of polystyrene based activated carbon for Ni (II) removal from aqueous solution. **Fuel Processing Technology** (149): 75-85.
- Gray, E., and Eppinger, G. (2012). Distribution of Cu, Co, As, and Fe in mine waste, sediment, soil and water in and around mineral deposits and mines of the Idaho Cobalt Belt, USA.

Applied Geochemistry (27): 1053-1062.

Guertin, J., Jacobs, J. A. and Avakian, C. P. (2005). **CHROMIUM (VI) HANDBOOK**. Boca Raton
London New York: **Washington, D.C.**

Gupta, K., Ganjali, M.R., Nayak, A., Bhushan, B., and Agarwal, S. (2012). Enhanced heavy metals removal and recovery by mesoporous adsorbent prepared from waste rubber tire. **Chemical Engineering Journal** (197): 330-342.

Gupta, K. Ali, I., Saleh, A., Siddiqui, M. N., and Agarwa, S. (2013). Chromium removal from water by activated carbon developed from waste rubber tires. **Environmental Science Pollution** (20): 1261-1268.

Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Siddiqui, M. N., and Agarwal, S. (2013). Chromium removal from water by activated carbon developed from waste rubber tires. **Environ Sci Pollut Res** (20): 1261-1268.

Hadi, P., Xu, M., Ning, C., Lin, C., McKay, G. (2015). A critical review on preparation, characterization and utilization of sludge-derived activated carbon for wastewater treatment. **Chem. Eng. J.** (260): 895-906.

Hadi, P., Yeung, K. Y., Guo, J., Wang, H. and McKay, G. (2016). Sustainable development of tyre char-based activated carbon with different textural properties for value-added applications. **Journal of Environmental Management** (170): 1-7.

Hager, L., O'Connell, C. and Souffrance S. (1998). **Water treatment plant design**. (3 rd. ed.). New York: **McGRAW-HILL**.

Harry, M. (2001). **Activated carbon compendium**. (1 st. ed.). Amsterdam, New York: **Elsevier**.

Hasar, H. (2003). Adsorption of Nickel (II) from aqueous solution into activated carbon prepared from almond husk. **Journal of Hazardous Materials B** (97): 49-57.

Hassler, J. W. (1974). **Purification with activated carbon: Industrial, Commercial and Environmental**. New York: **Chemical Publishing Co., Inc.**

Helmut Fischer. (n.d.). **X-ray fluorescence** [On-line]. Available: <https://www.helmut-fischer.com>

- Hosseini, S., Bringas, E., Tan, N., Ortiz, I., Ghahramani, M., and Shahmirzadi, M. (2016). Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review. **Journal of Water Process Engineering** (9): 78-110.
- Husain, A., Javed, I. and Khan, N. A. (2014). Characterization and treatment of electroplating industry wastewater using Fenton's reagent. **Journal of chemical and pharmaceutical Research** 6 (1): 622-627.
- Karmacharya, M.S., Gupta, V. K., Tyagi, I., Agarwal, S. and Jha, V.K. (2016). Removal of As (III) and As (V) using rubber tire derived activated carbon modified with alumina composite. **Journal of molecular liquids** (216): 836-844.
- Kim, C., Lee, S., Hwang, S., Cho, M., Kim, HS., and Noh, SH (2014). Removal of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) by membrane system combined with powdered activated carbon (PAC) for drinking water treatment. **Journal of water process engineering** (4): 91-98
- Kubonova, L., Langova, S., Nowak, B., and Winter, F. (2013). Thermal and hydrometallurgical recovery methods of heavy metals from municipal solid waste fly ash. **Waste Management** (33): 2322-2327.
- Kwiatkowski, M. and Broniek, E. (2017). An analysis of the porous structure of activated carbons obtained from hazelnut shells by various physical and chemical methods of activation. **Colloids and Surfaces A** (592): 443-453.
- Langmuir, D. (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. New Jersey: **Prentice-Hall**.
- Lata, S., Singh, P. K., Samadder, S. R. (2015). Regeneration of adsorbents and recovery of heavy metals: a review. **Int. J. Environ. Sci. Technol** (12): 1461-1478.
- Lee, S., Laldawngliana, C., and Tiwari, D. (2012). Iron oxide nano-particles- immobilized-sand material in the treatment of Cu (II), Cd (II) and Pb (II) contaminated waste waters. **Chemical Engineering Journal** 195-196, 103-111.

- Lee, CG., Song, MK., Ryu, JC., Park, C., Choi, JW., and Lee, SH (2016). Application of carbon foam for heavy metal removal from industrial plating wastewater and toxicity evaluation of the adsorbent. **Chemosphere** (153): 1-9.
- Lenia, G., Stefan, P. M., Grazyna, G., Robert, C. and Jan, Y. (2016). Preparation, characterization and application of polystyrene based activated carbons for Ni (II) removal from aqueous solution. **Fuel Processing Technology** (149): 75-85.
- Li, T., Shen, J., Huang, S., Li, N., and Ye, M. (2014). Hydrothermal carbonization synthesis of a novel montmorillonite supported carbon nanosphere adsorbent for removal of Cr (VI) from wastewater. **Applied Clay Science** 93-94, 48-55.
- Long, Y., Lei, D., Ni, J., Ren, Z., Chen, C. and Xu, H. (2014). Packed bed column studies on lead (II) removal from industrial wastewater by modified *Agaricus bisporus*. **Bioresource Technology** (152): 457-463.
- Machado, M. D., Soares, E. V., Soares, H. M. V. M. (2011). Selective recovery of chromium, copper, nickel and zinc from an acid solution using an environmentally friendly process. **Environ Sci Pollut Res** (18): 1279-1285.
- Malhotra, A., and Dhawan, D.K. (2014). Current view of zinc as a hepatoprotective agent in conditions of chlorpyrifos induced toxicity. **Pesticide Biochemistry and Physiology** (112): 1-6.
- Ma, M., Gao, H., Sun, Y., and Huang, M. (2015). The adsorption and desorption of Ni (II) on Al substituted goethite. **Journal of Molecular Liquids** (205): 30-35.
- Marsh, H. and Rodriguez-Reinoso, F. (2006). **Activated carbon**. Amsterdam: **Elsevier**.
- Matinez, J.D., Murillo, R. and Garcia, T. (2013). Production of carbon black from the waste tires pyrolysis. **Researchgate**.
- Metcalf and Eddy (2004). Wastewater Engineering, Treatment and reuse. (4 th. ed.). New York: **McGraw-Hill**.
- Montgomery, J. M. (1985). Water Treatment Principles and Design. New York: **Wiley**.

- Mousavi, H. Z., Housseynifar, A., Jahed, V. and Dehghani, S. A. M. (2010). Removal of Lead from aqueous solution using waste tire rubber ash as an adsorbent. **Brazilian Journal of Chemical Engineering** 79-87.
- Patila, S., Chavana, M., and Oubagaranadin, U .(2016). A review of technologies for manganese removal from wastewaters. **Journal of Environmental Chemical Engineering** (4): 468- 487.
- Pejman, H., Kit, Y.Y., Jiabin, G., Huaimin, W., and Gordon, M. (2016). Sustainable development of type char-based activated carbons with different textural properties for value-added applications. **Journal of environmental management** (170) 1-7.
- Rich, R. L. (2007). Inorganic Reactions in Water. Berlin Heidelberg: **Spring-Verlag**.
- Saka, C. (2012). BET, TG–DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with $ZnCl_2$. **Journal of analytical and applied pyrolysis** (95): 21-24.
- Saleh, T. A., Gupta, V. K., and Al-Saadi, A. A. (2013). Adsorption of lead ions from aqueous solution using porous carbon derived from rubber tires: Experimental and computational study. **Journal of Colloid and Interface Science** (396): 264-269.
- Saleh, T. A. and Gupta, V. K. (2014). Processing methods characteristics and adsorption behavior of tire derived carbon. **Advances in Colloid and Interface Science** (211): 93-101.
- Saleh, T. A. and Danmaliki, G. I. (2016). Influence of acidic and basic treatments of activated carbon derived from waste rubber tires on adsorptive desulfurization of thiophenes. **Journal of Taiwan institute Chemical engineers** (60): 460-468.
- Sarkar, B. (2002). Heavy Metals in the environment. **Marcel Dekker, Inc.** New York, **Basel**.
- Singha, S., B., and Das, SK. (2013). Adsorptive removal of Cu (II) from aqueous solution and industrial effluent using natural/agricultural wastes. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** (107): 97-106.
- Singh, J. and Lee, B. K. (2016). Recovery of precious metals from low-grade automobile shredder residue: A novel approach for the recovery of nanozero-valent copper particles. **Waste Management** (48): 353-365.

- Sun, K. and Jiang, J. C. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from rubberseed shell by physical activation with steam. **Biomass and bioenergy** (34): 539- 544.
- Tewari, D. P., Promod, K., Mishra, A. K., Singh, R. P., and Srivastav, R. P. S. (1989). Removal of toxic metals from electroplating industries (effect of pH on removal by adsorption). **Indian Journal. Environmental Health** (31): 120.
- Tiberg, C., and Gustafsson, JP. (2016). Phosphate effects on cadmium (II) sorption to ferrihydrite. **Journal of Colloid and Interface Science** (471): 103-111.
- Vinidhini, V. and Das, N. (2010). Packed bed column studies on Cr (VI) removal from tannery wastewater by neem sawdust. **Desalination** (264): 9-14.
- Wang, Y., Chen, L., Gao, Y., Zhang, Y., Wang, C., Zhou, Y., Hu, Y., Shi, R., and Tian, Y. (2016). Effects of prenatal exposure to cadmium on neurodevelopment of infants in Shandong. **China. Environmental Pollution** (211): 67-73.
- Williams, T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. **Waste Management** (33): 1714- 1728
- Worch, E. (2012). Adsorption Technology in Water Treatment Fundamentals, Processes and Modeling. Berlin, Germany: **Walter de Gruyter**.
- York and Salomons, Forstner and Mader. (1995). Heavy metals. Germany: **Springer**.
- Zhang, J., Li, Y., Zhou, J., Chen, D., and Qian, G. (2012). Chromium (VI) and zinc (II) waste water co-treatment by forming layered double hydroxides: Mechanism discussion via two different processes and application in real plating water. **Journal of Hazardous Materials** 205–206, 111–117.
- Zhou, Y., Hynes RJ. (2011). A comparison of inorganic solid wastes as adsorbents of heavy metal cations in aqueous solution and their capacity for desorption and regeneration. **Water Air Soil Pollut** (218): 457-470.
- Zulfadhly, Z., Mashitah, M.D., and Bhatia, S.)2001(. Heavy metals removal in fixed-bed column by the macro fungus *Pycnoporus sanguineus*. **Environmental Pollution** (112): 463-470.



ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์

1.1 การเตรียม 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาตร 1 ลิตร

1. ปิเปตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 30% มา 200 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

1.2 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร

1. ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% มา 98.52 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 1 ลิตร

2. การศึกษาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number)

2.1 การเตรียมสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

1. ชั่งไอโอดีน 12.7 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 19.10 กรัม ผสมกัน
2. ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร
3. เก็บใส่ขวดสีชา

2.2 การเตรียมโซเดียมไธโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

1. ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต 24.82 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น คนให้เข้ากัน
2. เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัว
3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร
4. เก็บใส่ขวดสีชา 4 วันก่อนใช้งาน

2.3 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริก 5%

1. ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% มา 135 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร

2.4 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดท (KIO_3) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

1. ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดท 3.57 มิลลิกรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตร

2.5 การทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardization) ของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

1. ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดท (KIO_3) มาปริมาตร 25 มิลลิลิตร (ข้อ 2.4) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมโพแทสเซียมไอโอไดร์ (KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลาย
3. ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตจนสารละลายเป็นสีเหลือง
4. หยคน้ำแบ่งเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรที่ไทเทรต แล้วคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$N_1 = (P.R)/S$$

N_1 คือ โซเดียมไซโอซัลเฟต (N)

P คือ โพแทสเซียมไอโอเดท (ml)

R คือ โพแทสเซียมไอโอเดท (N)

S คือ โซเดียมไซโอซัลเฟต (ml)

ตารางที่ ก.1 การทำให้เป็นมาตรฐานของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

สารละลาย	โพแทสเซียมไอโอเดท/P (มล.)	โพแทสเซียมไอโอเดท/R (นอร์มอล)	โซเดียมไซโอซัลเฟต/S (มล.)	$N_1 = (P.R)/S$ (นอร์มอล)
			25	0.1
โซเดียมไซโอซัลเฟต (N_1)	25	0.1	25.5	0.098
			25	0.1
	เฉลี่ย		25.17	0.099/0.1

2.6 การทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardization) ของสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

1. ปิเปตสารละลายไอโอดีน (ข้อ 2) มาปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (ข้อ 2.5) จนสารละลายเป็นสีเหลือง หยคน้ำแบ่งและไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรที่ไทเทรตแล้วคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$N_2 = (S.N_1)/I$$

N_2 คือ ไอโอดีน (N)

S คือ โซเดียมไซโอซัลเฟต (ml)

N_1 คือ โซเดียมไซโอซัลเฟต (N)

I คือ ไอโอดีน (ml)

ตารางที่ ก.2 การทำให้เป็นมาตรฐานของสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

สารละลาย	โซเดียมไอโอดีน ซัลเฟต/S (มล.)	$N_1 = (P.R)/S$ (นอร์มอล)	ไอโอดีน (มล.)	$N_2 = (S.N_1)/I$
			25	0.1
ไอโอดีน (N_1)	25	0.1	25.25	0.101
			25.5	0.102
	เฉลี่ย		25.25	0.101/0.1

3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตต็อกสารละลายมาตรฐานนิกเกิลและโครเมียมที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยไมโครปิเปต มาปริมาตรละ 1,000 ไมโครลิตร

2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร

4. การเตรียมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ (ความหนาแน่น 1.84)

ปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น 95% มา 100.08 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิตร

5. การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนได้ 1,000 มิลลิตร ในขวดปรับปริมาตร

6. การเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ความหนาแน่น 1.39)

ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น 70% มา 9.01 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรจนได้ 1,000 มิลลิตร

7. การเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ (ความหนาแน่น 1.39)

ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น 70% มา 90.09 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรจนได้ 1,000 มิลลิตร

8. การเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 % (ความหนาแน่น 1.39)

ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น 65% มา 15.39 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรจนได้ 1,000 มิลลิตร

9. การเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้น 20 % (ความหนาแน่น 1.39)

ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น 65% มา 307.69 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรจนได้ 1,000 มิลลิตร

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์นิกเกิลด้วยวิธี Direct Air-Acetylene Flame (APHA, AWWA, WPCF, 2005)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS)
2. Ni Hollow cathode lamp
3. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. กระจกนาฬิกา
5. เม็ดกลาสบีก

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดไนตริก (Nitric acid) เข้มข้น
3. สารละลายมาตรฐานนิกเกิล ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นมาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ใส่เม็ดกลาสบีก 2-3 เม็ด
3. เติมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา
4. นำไปย่อยบน hot plate จนสารละลายตัวอย่างเหลือประมาณ 10-20 มิลลิลิตร
5. เทสารละลายตัวอย่างลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยการกล้วด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ทำการผสมให้เข้ากันของสารละลายตัวอย่าง (หากเกิดตะกอนต้องทำการกรองก่อน)
6. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และนำไปคำนวณโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

1. การวิเคราะห์โครเมียมด้วยวิธี Direct Air-Acetylene Flame (APHA, AWWA, WPCF, 2005)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS)
2. Ni Hollow cathode lamp
3. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

4. กระจกนาฬิกา

5. เม็ดกลาสบีท

สารเคมี

1. น้ำกลั่น

2. กรดไนตริก (Nitric acid) เข้มข้น

3. สารละลายมาตรฐาน โครเมียมความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นมาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. ใส่เม็ดกลาสบีท 2-3 เม็ด

3. เติมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา

4. นำไปย่อยบน hot plate จนสารละลายตัวอย่างเหลือประมาณ 10-20 มิลลิลิตร

5. เทสารละลายตัวอย่างลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยการกล้วด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ทำการผสมให้เข้ากันของสารละลายตัวอย่าง (หากเกิดตะกอนต้องทำการกรองก่อน)

6. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และนำไปคำนวณ โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

ภาคผนวก ค
กราฟมาตรฐาน

1. กราฟมาตรฐานของนิกเกิล

การเตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิลเตรียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

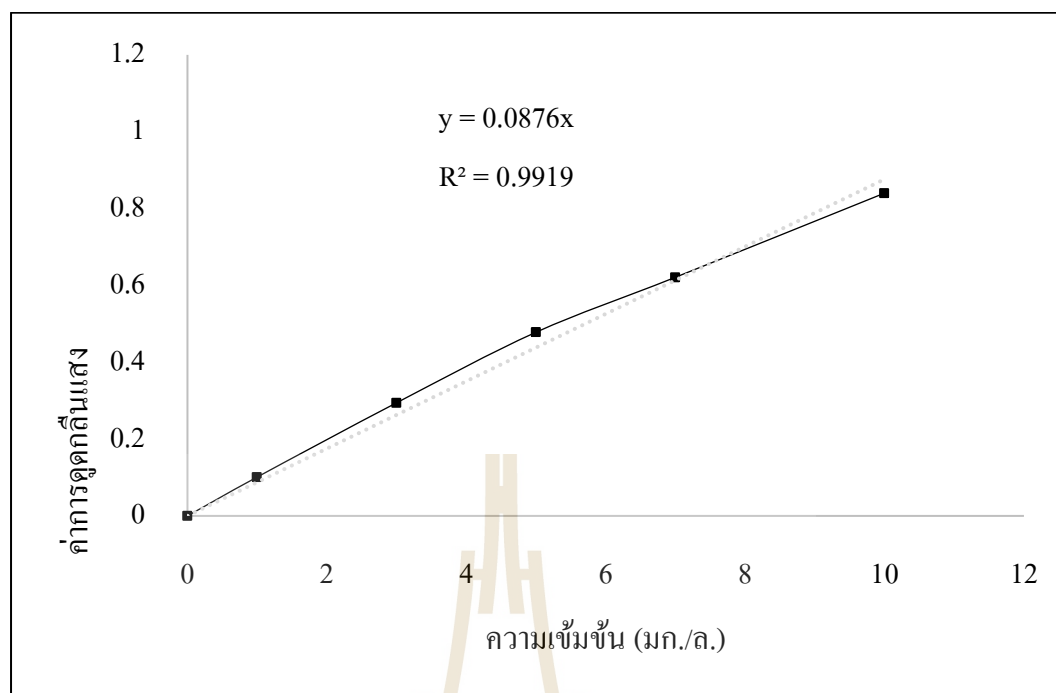
1. สารละลายมาตรฐานนิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. กรดไนตริกความเข้มข้น 1%
3. น้ำกลั่น

วิธีการศึกษา

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานมา 0, 50, 150, 250, 350 และ 500 ไมโครลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1% ทำการผสม
3. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

ตารางที่ ค.1 มาตรฐานนิกเกิล (Nickel standard)

ความเข้มข้น (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)			ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3		
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000000
1	0.100010	0.10064	0.10263	0.10112	0.002264
3	0.29177	0.29563	0.29575	0.29438	0.002264
5	0.47697	0.47822	0.48392	0.47797	0.003705
7	0.61760	0.62052	0.62505	0.62106	0.003754
10	0.84183	0.83916	0.83925	0.84008	0.001516



ภาพที่ ค.1 กราฟสารละลายมาตรฐานนิกเกิล

2. กราฟมาตรฐานของโครเมียม

การเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียมเตรียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาดังตารางที่ 2 และภาพที่ 2

สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

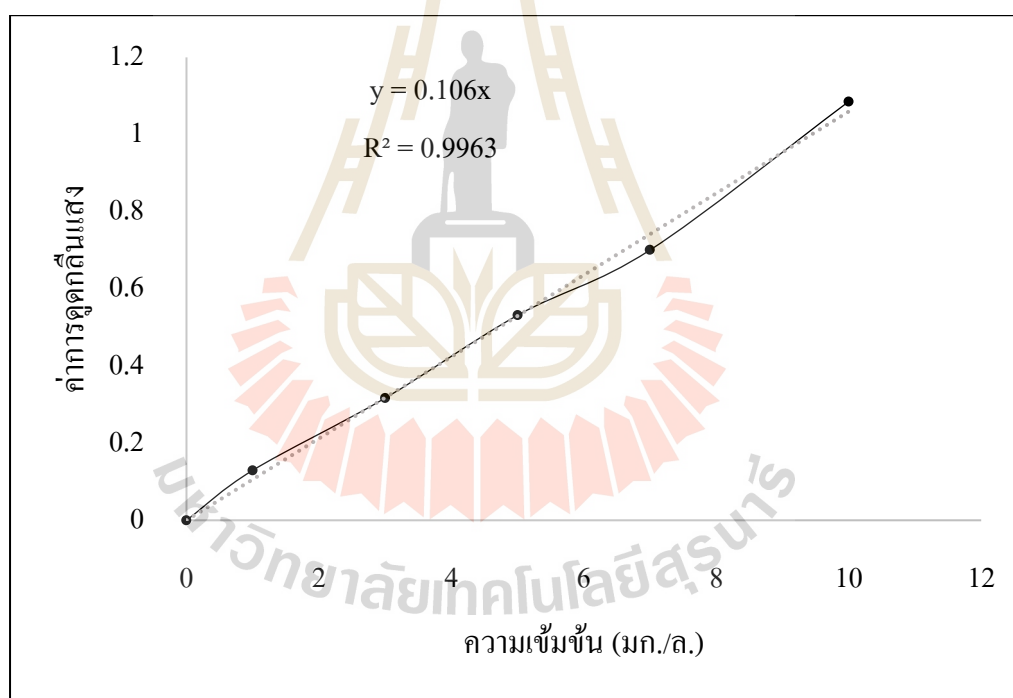
1. สารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. กรดไนตริกความเข้มข้น 1%
3. น้ำกลั่น

วิธีการศึกษา

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานมา 0, 50, 150, 250, 350 และ 500 ไมโครลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1% ทำการผสม
3. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

ตารางที่ ค.2 ค่าการดูดซับสารมาตรฐาน โครเมียม

ความเข้มข้น (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสง (Adsorbance)				ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3	4		
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.13317	0.12808	0.12775	0.12874	0.12944	0.002524
3	0.31910	0.31656	0.31307	0.31825	0.31674	0.002668
5	0.46870	0.55557	0.56144	0.54011	0.53145	0.042793
7	0.71424	0.69382	0.66652	0.72784	0.70061	0.026680
10	1.06760	1.09570	1.06570	1.11300	1.08550	0.022896



ภาพที่ ค.2 กราฟสารละลายมาตรฐาน โครเมียม

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวและองค์ประกอบของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์
(FE-SEM/EDX) รุ่น AURIGA



Carbon black

6/5/2017 3:33:44 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

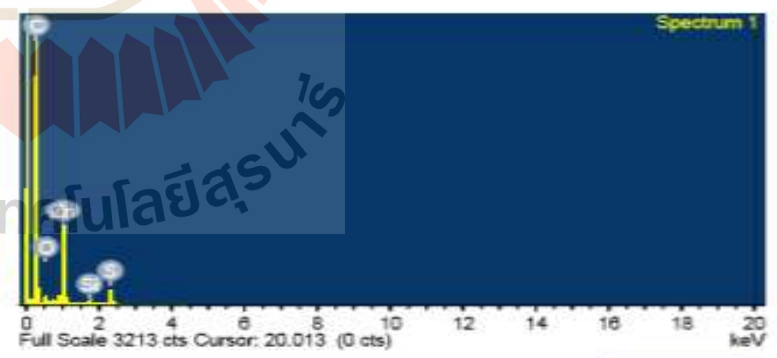
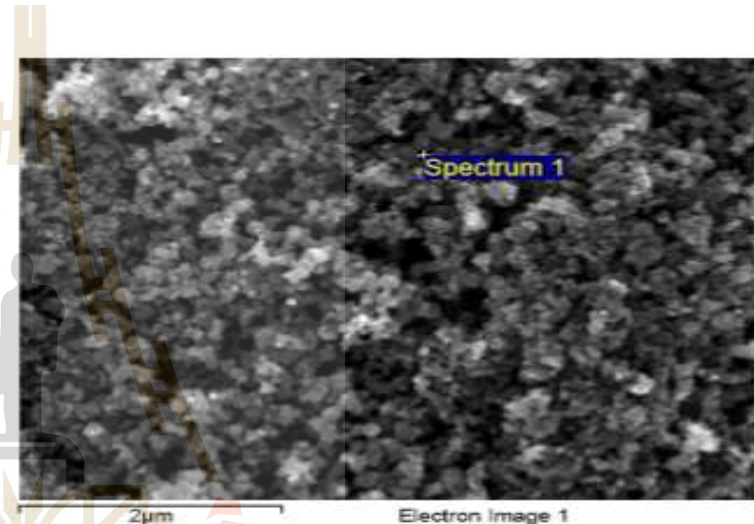
Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

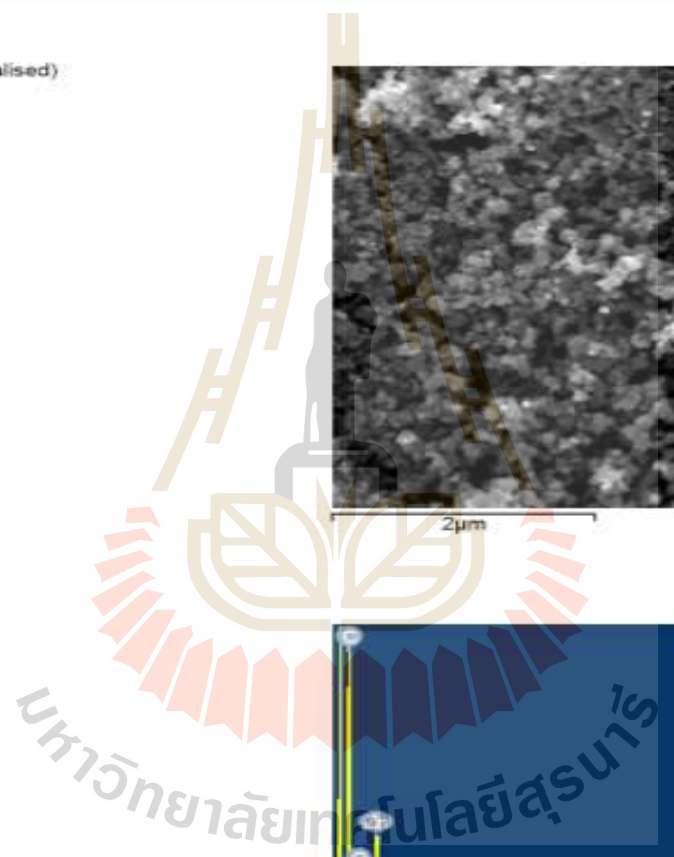
Elem... Weight% Atomic%

C K	61.62	85.33
O K	2.10	2.18
Si K	1.19	0.70
S K	10.79	5.60
Zn L	24.30	6.18

Totals 100.00



Comment:



Carbon black

6/5/2017 3:34:01 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

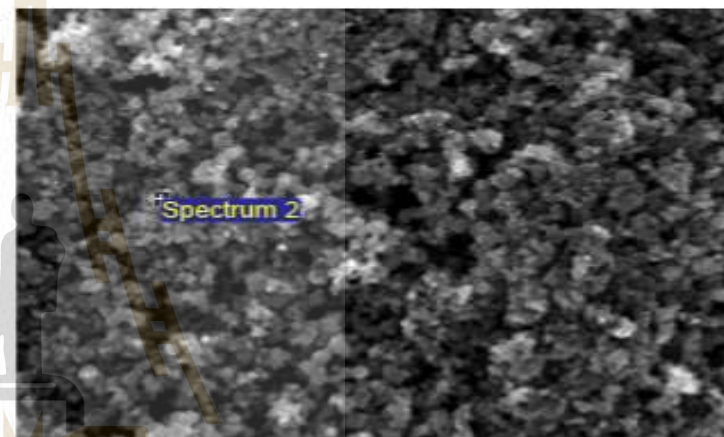
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

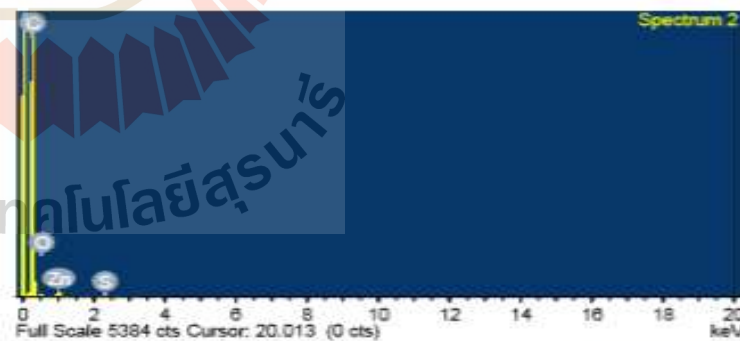
Elem... Weight% Atomic%

Elem...	Weight%	Atomic%
C K	94.74	97.77
O K	1.54	1.19
S K	1.09	0.65
Zn L	2.04	0.39

Totals 100.00



Electron Image 1



Comment:



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Carbon black

6/5/2017 3:34:28 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

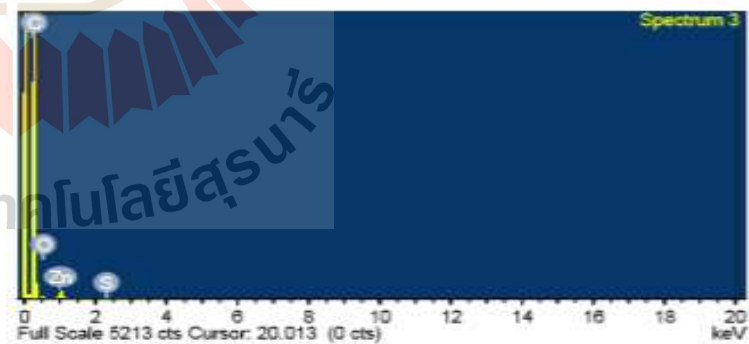
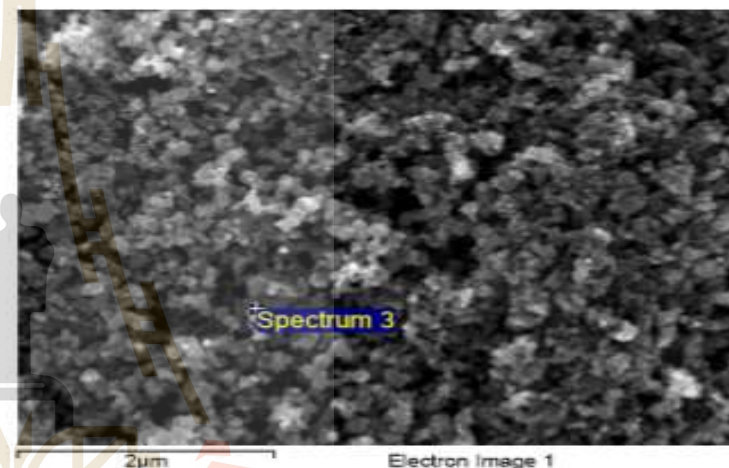
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

C K	92.21	97.18
O K	1.38	1.09
S K	2.50	0.99
Zn L	3.91	0.76

Totals 100.00



Comment:

OXFORD
INSTRUMENTS
The Revolution of Science

Carbon black

6/5/2017 3:34:44 PM

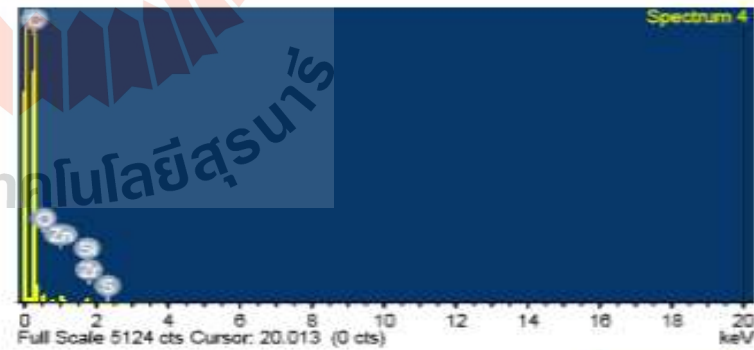
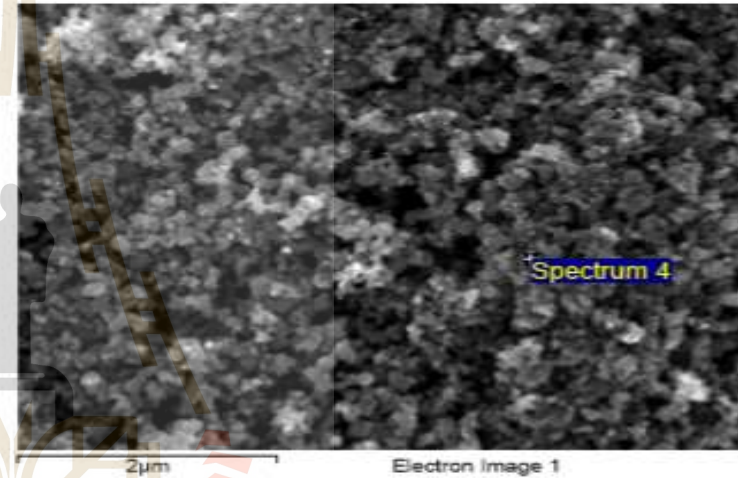
Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM
Zr Zr 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem...	Weight%	Atomic%
C K	85.73	94.02
O K	3.83	3.16
Si K	1.89	0.89
S K	1.91	0.79
Zn L	3.40	0.68
Zr L	3.23	0.47
Totals	100.00	



Comment:



Carbon black

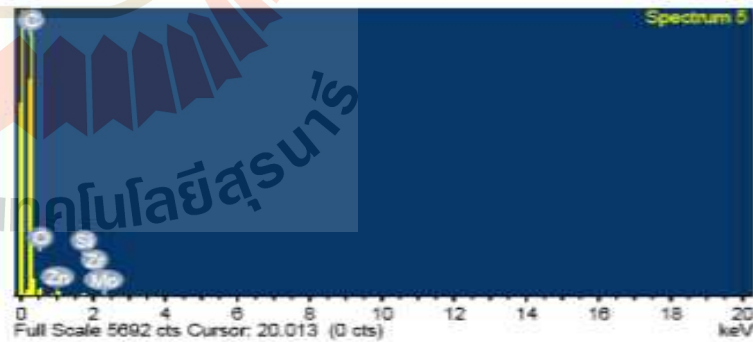
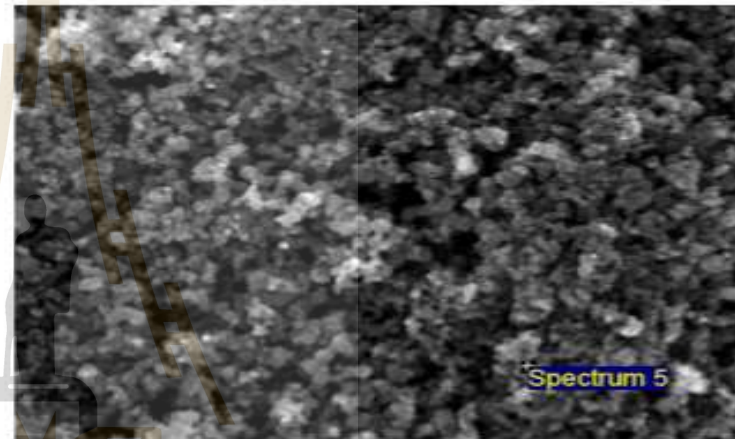
6/5/2017 3:35:04 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM
Zr Zr 1-Jun-1999 12:00 AM
Mo Mo 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem...	Weight%	Atomic%
C K	85.75	94.72
O K	3.87	3.21
Si K	1.47	0.70
Zn L	1.93	0.39
Zr L	3.41	0.50
Mo L	3.57	0.49
Totals	100.00	



Comment:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Activated carbon

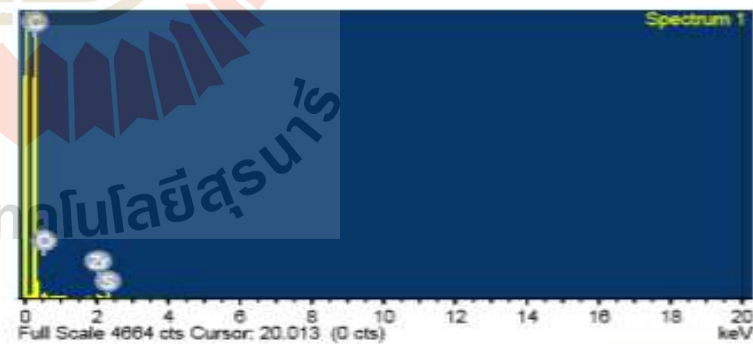
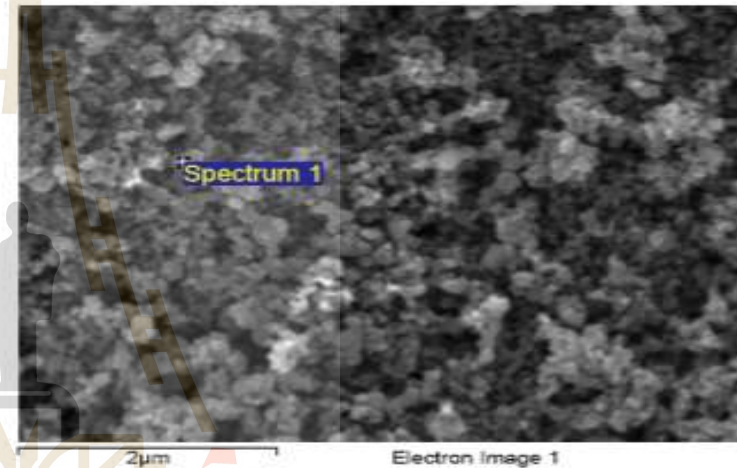
6/5/2017 3:36:09 PM

Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 1.020 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zr Zr 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem...	Weight%	Atomic%
C K	88.18	94.91
O K	3.20	2.65
S K	3.37	1.39
Zr L	7.25	1.05
Totals	100.00	



Comment:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Activated carbon

6/5/2017 3:36:49 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

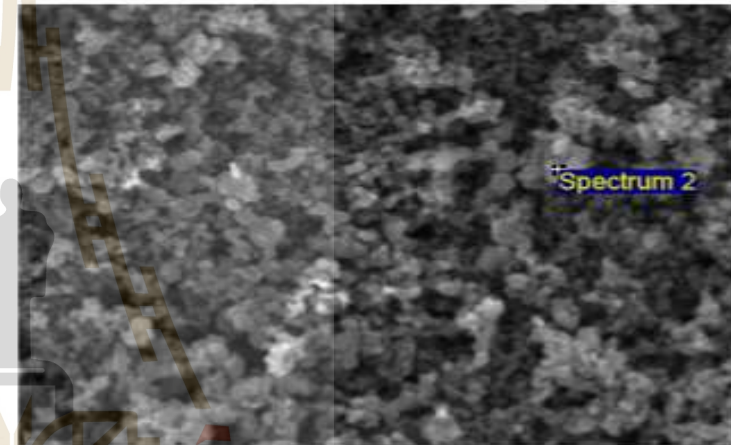
Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM
Pt Pt 1-Jun-1999 12:00 AM

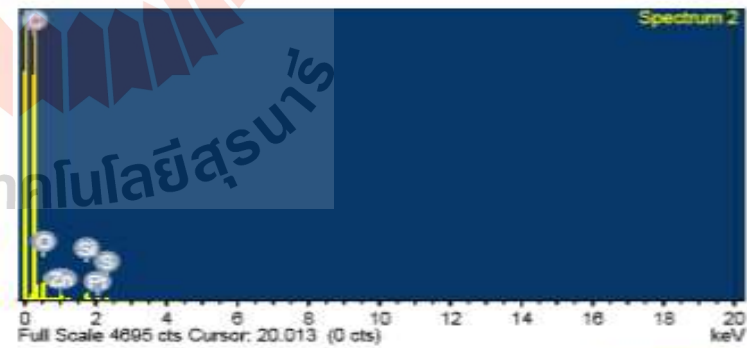
Elem... Weight% Atomic%

C K	78.12	87.60
O K	10.12	8.75
Si K	3.99	1.96
S K	1.72	0.74
Zn L	2.64	0.56
Pt M	5.40	0.38

Totals 100.00



Electron Image 1



Comment:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Activated carbon

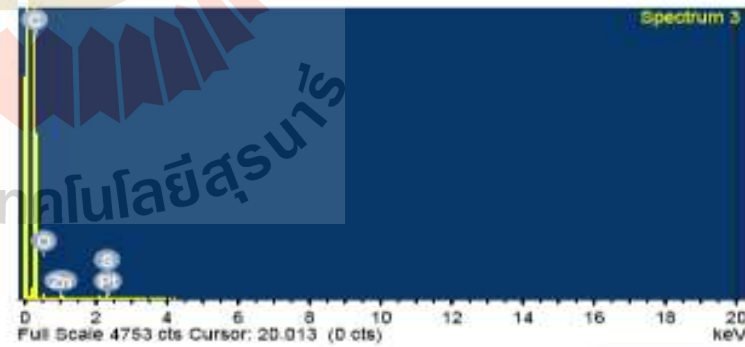
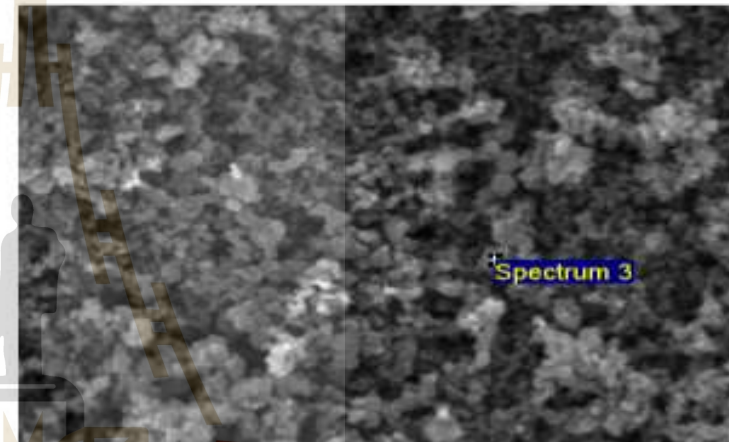
6/5/2017 3:37:17 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM
Pt Pt 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem...	Weight%	Atomic%
C K	83.91	95.24
O K	3.09	2.64
S K	2.92	1.24
Zn L	1.30	0.27
Pt M	8.78	0.61
Totals	100.00	



Comment:



Activated carbon

6/5/2017 3:37:45 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

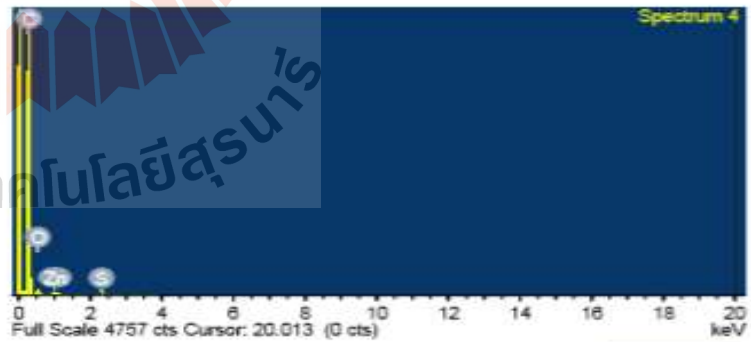
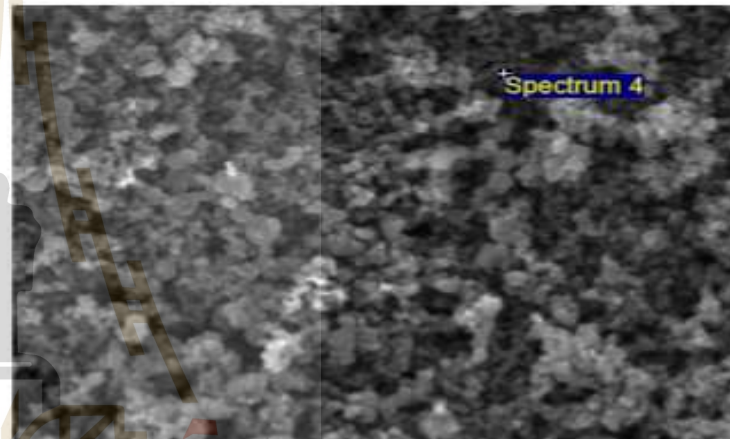
Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

C K	91.50	95.55
O K	3.43	2.69
S K	3.98	1.56
Zn L	1.09	0.21

Totals 100.00



Comment:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Activated carbon

6/5/2017 3:38:03 PM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

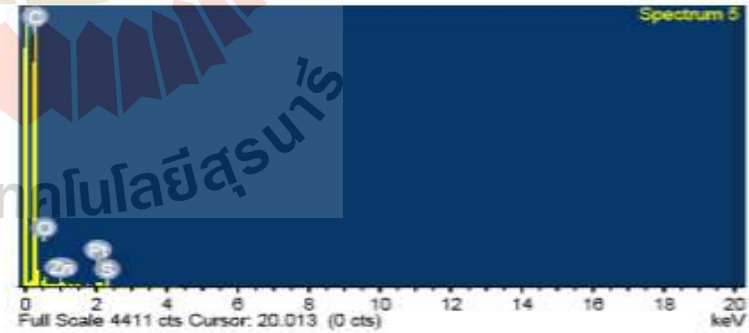
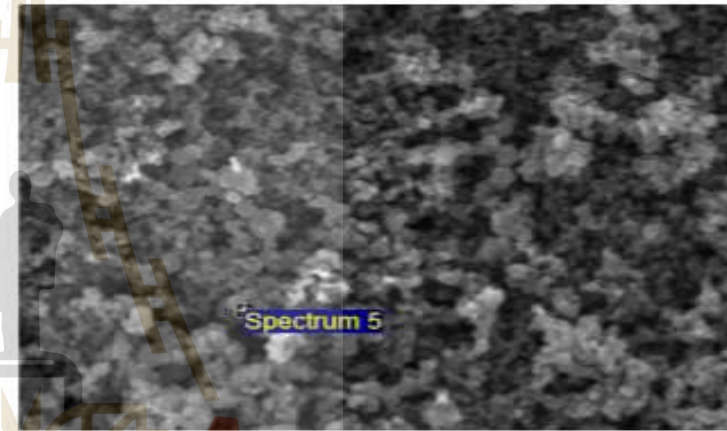
Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM
Pt Pt 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

CK	79.84	94.22
OK	3.64	3.14
SK	3.37	1.49
Zn L	1.34	0.29
Pt M	11.90	0.88

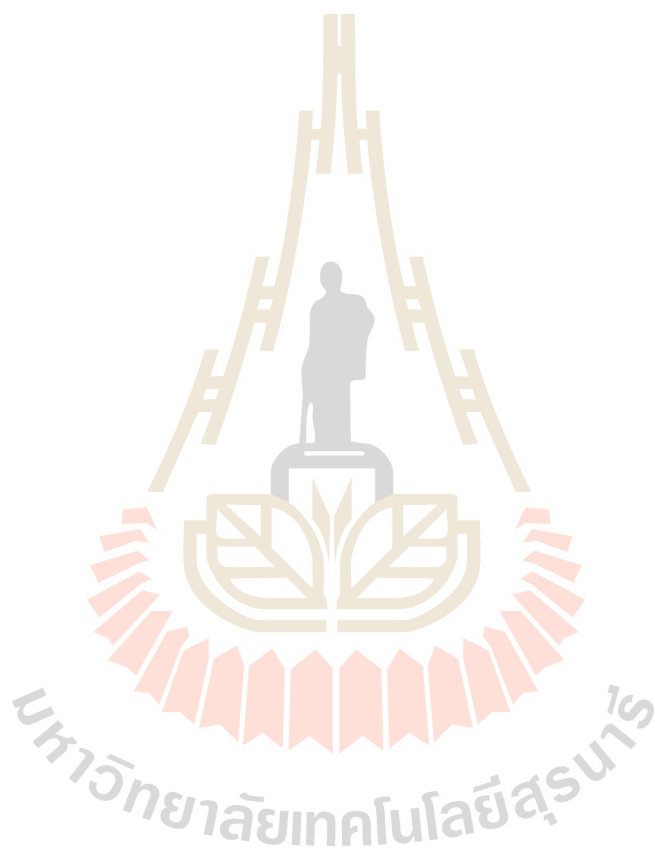
Totals 100.00

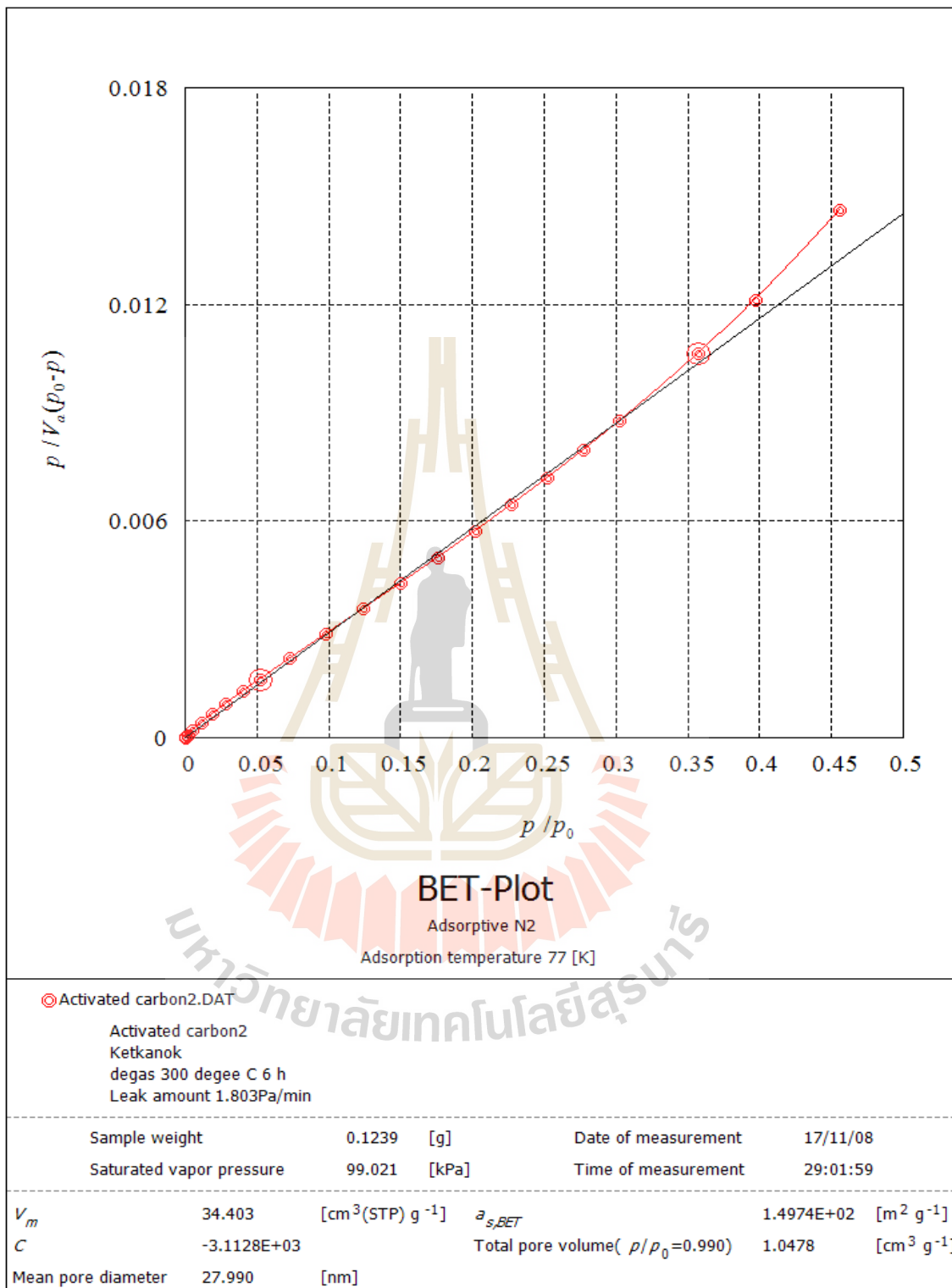


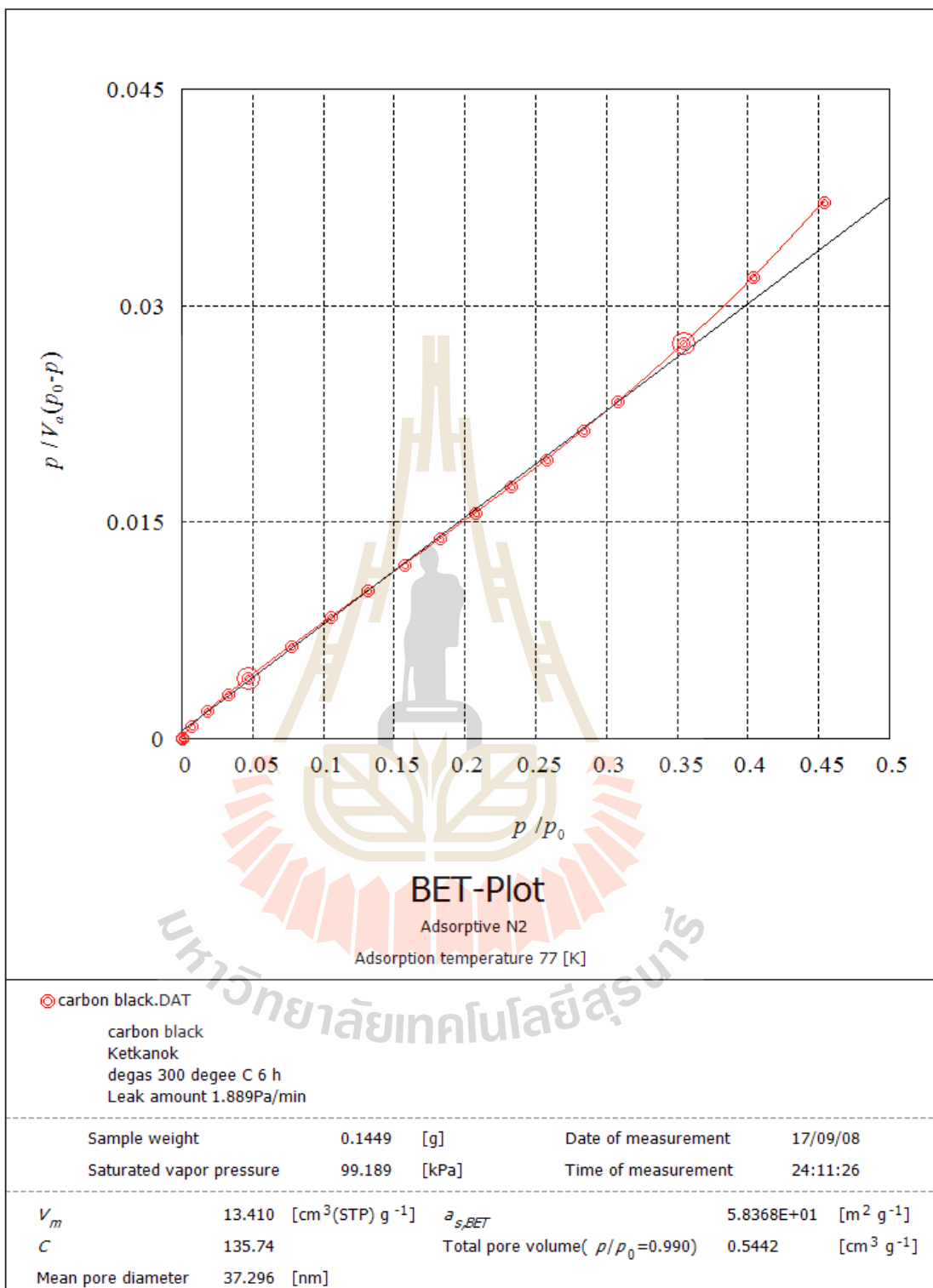
Comment:

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของคาร์บอนแบล็คและถ่านกัมมันต์
ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนของวัสดุ (BET) รุ่นBel sorp mini 11







ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาคำนวณ



ตารางที่ ๑.1 ค่าการดูดกลืนแสงในสภาวะการดูดซับที่แตกต่างกัน

ปริมาณ ถ่านกัม มันต์ (กรัม)	pH	นิกเกิล					โครเมียม				
		ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)					ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)				
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
3	2	0.690±0.008	0.694±0.005	0.666±0.005	0.662±0.011	0.667±0.004	0.622±0.105	0.631±0.107	0.305±0.033	0.214±0.024	0.297±0.115
		0.692±0.008	0.704±0.005	0.668±0.005	0.672±0.011	0.666±0.004	0.589±0.105	0.576±0.107	0.295±0.033	0.168±0.024	0.137±0.115
		0.678±0.008	0.698±0.005	0.675±0.005	0.684±0.011	0.659±0.004	0.426±0.105	0.424±0.107	0.243±0.033	0.200±0.024	0.074±0.115
เฉลี่ย	0.687±0.008	0.699±0.005	0.670±0.005	0.673±0.011	0.664±0.004	0.546±0.105	0.544±0.107	0.281±0.033	0.194±0.024	0.169±0.115	
3	4	0.540±0.001	0.588±0.002	0.579	0.586±0.001	0.585±0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.541±0.001	0.586±0.002	0.579	0.584±0.001	0.583±0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.541±0.001	0.585±0.002	0.579	0.584±0.001	0.580±0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
เฉลี่ย	0.541±0.001	0.586±0.002	0.579	0.585±0.001	0.583±0.003	ND	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
3	5	0.415±0.023	0.441±0.009	0.419±0.020	0.403±0.029	0.335±0.064	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.450±0.023	0.457±0.009	0.458±0.020	0.420±0.029	0.450±0.064	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.408±0.023	0.441±0.009	0.436±0.020	0.460±0.029	0.442±0.064	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
เฉลี่ย	0.424±0.023	0.446±0.009	0.438±0.020	0.428±0.029	0.409±0.064	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง วิเคราะห์ไม่พบ

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ๑.1 ค่าการดูดกลืนแสงในสภาวะการดูดซับที่แตกต่างกัน (ต่อ)

ปริมาณ ถ่านกัม มันต์ (กรัม)	pH	นิกเกิล					โครเมียม				
		ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)					ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)				
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
5	2	0.687±0.005	0.654±0.020	0.672±0.09	0.684±0.003	0.667±0.004	0.698±0.013	0.579±0.016	0.544±0.023	0.544±0.061	0.426±0.009
		0.691±0.005	0.683±0.020	0.684±0.09	0.685±0.003	0.666±0.004	0.716±0.013	0.611±0.016	0.534±0.023	0.489±0.061	0.440±0.009
		0.696±0.005	0.693±0.020	0.690±0.09	0.680±0.003	0.660±0.004	0.724±0.013	0.598±0.016	0.501±0.023	0.423±0.061	0.424±0.009
เฉลี่ย	0.691±0.005	0.677±0.020	0.682±0.09	0.683±0.003	0.664±0.004	0.713±0.013	0.596±0.016	0.526±0.023	0.485±0.061	0.430±0.009	
5	4	0.607±0.002	0.608±0.002	0.614±0.004	0.610±0.001	0.568±0.002	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.610±0.002	0.604±0.002	0.612±0.004	0.611±0.001	0.567±0.002	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.610±0.002	0.605±0.002	0.607±0.004	0.609±0.001	0.570±0.002	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
เฉลี่ย	0.610±0.002	0.606±0.002	0.611±0.004	0.610±0.001	0.568±0.002	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
5	5	0.339±0.611	0.334±0.03	0.329±0.014	0.323±0.030	0.331±0.026	0.002±0.001	0.002±0.001	0.003±0.001	0.002±0.001	0.003±0.001
		0.322±0.611	0.343±0.03	0.340±0.014	0.322±0.030	0.316±0.026	0.001±0.001	0.001±0.001	0.002±0.001	0.002±0.001	0.002±0.001
		0.239±0.611	0.290±0.03	0.313±0.014	0.270±0.030	0.281±0.026	0.002±0.001	0.002±0.001	0.003±0.001	0.003±0.001	0.002±0.001
เฉลี่ย	0.300±0.611	0.322±0.03	0.327±0.014	0.305±0.030	0.309±0.026	0.002±0.001	0.002±0.001	0.003±0.001	0.002±0.001	0.002±0.001	

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง วิเคราะห์ไม่พบ

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่บางค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ๑.1 ค่าการดูดกลืนแสงในสภาวะการดูดซับที่แตกต่างกัน (ต่อ)

ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)	pH	นิกเกิล					โครเมียม				
		ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)					ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)				
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
10	2	0.553±0.022	0.566±0.017	0.551±0.007	0.519±0.059	0.540±0.017	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.597±0.022	0.581±0.017	0.544±0.007	0.452±0.059	0.572±0.017	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.574±0.022	0.599±0.017	0.557±0.007	0.569±0.059	0.565±0.017	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
เฉลี่ย	0.575±0.022	0.582±0.017	0.551±0.007	0.513±0.059	0.559±0.017	ND	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
10	4	0.544±0.005	0.528±0.019	0.524±0.008	0.528±0.004	0.547±0.007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.554±0.005	0.528±0.019	0.530±0.008	0.522±0.004	0.536±0.007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.552±0.005	0.496±0.019	0.539±0.008	0.522±0.004	0.535±0.007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
เฉลี่ย	0.550±0.005	0.517±0.019	0.531±0.008	0.524±0.004	0.539±0.007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
10	5	0.312±0.017	0.193±0.172	0.503±0.011	0.508±0.024	0.507±0.004	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.327±0.017	0.494±0.172	0.525±0.011	0.517±0.024	0.513±0.004	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		0.293±0.017	0.487±0.172	0.514±0.011	0.472±0.024	0.513±0.004	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
เฉลี่ย	0.311±0.017	0.391±0.172	0.514±0.011	0.499±0.024	0.511±0.004	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง วิเคราะห์ไม่พบ

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่ยังค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ๑.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับนิกเกิล

ตัวอย่างน้ำเสีย สังเคราะห์	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่อยู่ใน ถ่านกัมมันต์ (มก./ล.)	ปริมาณที่อยู่ใน ถ่านกัมมันต์ (มก./ก.)
5mg/l	0.101±0.031	1.150±0.348	3.850±0.348	0.128±0.012
	0.070±0.031	0.796±0.348	4.204±0.348	0.140±0.012
	0.040±0.031	0.454±0.348	4.546±0.348	0.152±0.012
เฉลี่ย	0.070±0.031	0.800±0.348	4.200±0.348	0.140±0.012
	0.075±0.002	0.857±0.028	0.066±0.028	0.752±0.001
	0.076±0.002	0.865±0.028	0.060±0.028	0.681±0.001
10mg/l	0.080±0.002	0.910±0.028	0.057±0.028	0.648±0.001
	0.077±0.002	0.877±0.028	0.061±0.028	0.693±0.001
	0.06591±0.005	0.752±0.053	22.485±0.531	0.750±0.018
30mg/l	0.0597±0.005	0.681±0.053	23.193±0.531	0.773±0.018
	0.05679±0.005	0.648±0.053	23.525±0.531	0.784±0.018
	0.0608±0.005	0.693±0.053	23.067±0.531	0.769±0.018
เฉลี่ย	0.137±0.003	15.576±0.380	34.424±0.380	1.148±0.013
	0.131±0.003	14.920±0.380	35.080±0.380	1.169±0.013
	0.137±0.003	15.582±0.380	34.419±0.380	1.147±0.013
50mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	0.135±0.003	15.359±0.380	34.641±0.380	1.155±0.013
	0.247±0.001	28.268±0.134	71.732±0.001	2.3391±0.047
	0.246±0.001	28.057±1.403	71.943±0.001	2.398±0.047
100mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	0.246±0.001	28.019±1.403	71.981±0.001	2.399±0.047
	0.247±0.001	28.115±1.403	71.885±0.001	2.396±0.047
	0.714±0.015	81.405±1.672	118.60±1.672	3.953±0.056
200mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	0.739±0.015	84.298±1.672	115.702±1.672	3.857±0.056
	0.739±0.015	84.305±1.672	115.704±1.672	3.857±0.056
	0.731±0.015	83.336±1.672	116.664±1.672	3.889±0.056
เฉลี่ย	0.918±0.001	136.107±0.149	113.893±0.149	3.796±0.005
	0.920±0.001	136.300±0.115	113.700±0.115	3.790±0.005
	0.920±0.001	136.401±0.115	113.599±0.115	3.787±0.005
250mg/l (เจือจาง 13 เท่า)	0.919±0.001	136.269±0.115	113.731±0.115	3.791±0.005

ตารางที่ ๓.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับโครเมียม

ตัวอย่างน้ำเสีย สังเคราะห์	ค่าการดูดกลืน แสง(Abs)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่อยู่ใน ถ่านกัมมันต์ (มก./ล.)	ปริมาณที่อยู่ในถ่าน กัมมันต์ (มก./ก.)
5mg/l	-0.012±0.001	-0.112±0.004	5.112±0.004	0.170
	-0.012±0.001	-0.116±0.004	5.116±0.004	0.171
	-0.011±0.001	-0.108±0.004	5.108±0.004	0.170
เฉลี่ย	0±0.001	-0.112±0.004	5.112±0.004	0.170
10mg/l	-0.014	-0.134±0.004	10.134±0.004	0.338
	-0.014	-0.133±0.004	10.133±0.004	0.338
	-0.014	-0.127±0.004	10.127±0.004	0.338
เฉลี่ย	-0.014	-0.131±0.004	10.131±0.004	0.338
30mg/l	-0.015±0.001	-0.139±0.013	31.388±0.132	1.046±0.004
	-0.012±0.001	-0.112±0.013	31.124±0.132	1.038±0.004
	-0.013±0.001	-0.126±0.013	31.255±0.132	1.042±0.004
เฉลี่ย	-0.014±0.001	-0.126±0.013	31.256±0.132	1.042±0.004
50mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	0.034	3.236±0.014	46.764±0.014	1.559
	0.034	3.208±0.014	46.792±0.014	1.560
	0.034	3.226±0.014	46.774±0.014	1.559
เฉลี่ย	0.034	3.223±0.014	46.777±0.014	1.559
100mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	0.164	15.433±0.002	84.567±0.002	2.819
	0.164	15.429±0.002	84.571±0.002	2.819
	0.164	15.430±0.002	84.570±0.002	2.819
เฉลี่ย	0.164	15.431±0.002	84.569±0.002	2.819
200mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	0.845±0.022	79.753±2.034	120.247±2.034	4.008±0.068
	0.804±0.022	75.804±2.034	124.196±2.034	4.140±0.068
	0.833±0.022	78.627±2.034	121.373±2.034	4.046±0.068
เฉลี่ย	0.827±0.022	78.061±2.034	121.939±2.034	4.065±0.068

ตารางที่ ๓.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับโครเมียม (ต่อ)

ตัวอย่างน้ำเสีย สังเคราะห์	ค่าการดูดกลืน แสง(Abs)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่อยู่ใน ถ่านกัมมันต์ (มก./ล.)	ปริมาณที่อยู่ในถ่าน กัมมันต์ (มก./ก.)
250mg/l (เจือจาง 10 เท่า)	1.102±0.329	103.991±31.001	146.009±31.001	4.867±1.034
	1.212±0.329	114.292±31.001	135.708±31.001	4.524±1.034
	1.718±0.329	162.104±31.001	87.896±31.001	2.930±1.034
เฉลี่ย	1.344±0.329	126.796±31.001	123.204±31.001	4.107±1.034

หมายเหตุ N.D. (Not detected) หมายถึง วิเคราะห์ไม่พบ

-ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางเป็นผลค่าเฉลี่ย (Average) ที่ได้จากการทดลอง (Mean±SD) ในกรณีที่ยังค่าในตารางไม่ได้แสดงค่า SD แสดงว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ย



ตารางที่ ๑.4 ค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของการศึกษาการดูดซับในน้ำเสียชุมชนโลหะ

ระยะเวลาในการสัมผัส (นาที)	นิกเกิล		โครเมียม	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น
	(Abs)	(มก./ล.)	(Abs)	(มก./ล.)
Control	0.590±0.001	76.785±0.117	1.599±0.003	190.178±0.374
	0.588±0.001	76.579±0.117	1.602±0.003	190.499±0.374
	0.590±0.001	76.780±0.117	1.598±0.003	189.976±0.374
	0.590±0.001	76.780±0.117	1.595±0.003	189.608±0.374
เฉลี่ย	0.589± 0.001	76.715±0.117	1.599±0.003	190.065± 0.374
30	0.500±0.007	65.155±0.879	1.599±0.006	190.083±0.733
	0.502±0.007	65.345±0.879	1.597±0.006	189.893±0.733
	0.513±0.007	66.763±0.879	1.587±0.006	188.656±0.733
	0.513±0.007	66.763±0.879	1.600±0.006	190.285±0.733
เฉลี่ย	0.505±0.007	65.754±0.879	1.596±0.006	189.730±0.733
Control	0.583±0.004	75.876±0.564	1.592±0.005	189.310±0.638
	0.585±0.004	76.158±0.564	1.596±0.005	189.727±0.638
	0.591±0.004	76.962±0.564	1.603±0.005	190.606±0.638
	0.591±0.004	76.962±0.564	1.603±0.005	190.559±0.638
เฉลี่ย	0.586±0.004	76.332±0.564	1.598±0.005	190.051± 0.638
60	0.513±0.004	66.811±0.552	1.573±0.004	187.075±0.476
	0.521±0.004	67.866±0.552	1.567±0.004	186.266±0.476
	0.515±0.004	67.056±0.552	1.565±0.004	186.088±0.476
	0.515±0.004	67.056±0.552	1.572±0.004	186.885±0.476
เฉลี่ย	0.516±0.004	67.244±0.552	1.569±0.004	186.579±0.476
Control	0.573±0.004	74.612±0.549	1.592±0.005	189.310±0.638
	0.575±0.004	74.898±0.549	1.596±0.005	189.727±0.638
	0.581±0.004	75.673±0.549	1.603±0.005	190.606±0.638
	0.581±0.004	75.673±0.549	1.603±0.005	190.559±0.638
เฉลี่ย	0.577±0.004	75.061±0.549	1.598±0.005	190.051±0.638

ตารางที่ ๑.4 ค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของการศึกษาการดูดซับในน้ำเสียชุมชน (ต่อ)

ระยะเวลาในการสัมผัส (นาที)	นิกเกิล		โครเมียม	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น
	(Abs)	(มก./ล.)	(Abs)	(มก./ล.)
90	0.510±0.003	66.456±0.370	1.555±0.007	184.840±0.767
	0.514±0.003	66.875±0.370	1.568±0.007	186.385±0.767
	0.516±0.003	67.194±0.370	1.564±0.007	185.993±0.767
			1.555±0.007	184.947±0.767
เฉลี่ย	0.513±0.003	66.842±0.370	1.560±0.007	185.541±0.767
Control	0.580±0.001	75.501±0.179	1.587±.004	188.728±0.490
	0.578±0.001	75.191±0.179	1.597±.004	189.917±0.490
	0.580±0.001	75.503±0.179	1.593±.004	189.406±0.490
			1.592±.004	189.239±0.490
เฉลี่ย	0.579±0.001	75.398±0.179	1.592±.004	189.322±0.490
120	0.502±0.002	65.378±0.260	1.528±0.011	181.724±1.283
	0.505±0.002	65.753±0.260	1.550±0.011	184.352±1.283
			1.543±0.011	183.496±1.283
	0.506±0.002	65.878±0.260	1.552±0.011	184.530±1.283
เฉลี่ย	0.504±0.002	65.669±0.260	1.544±0.011	183.526±1.283
Control	0.573±0.002	74.646±0.196	1.599±0.003	190.178±0.374
	0.576±0.002	74.956±0.196	1.602±0.003	190.499±0.374
			1.598±0.003	189.976±0.374
	0.576±0.002	75.008±0.196	1.595±0.003	189.608±0.374
เฉลี่ย	0.575±0.002	74.870±0.196	1.599±0.003	190.065±0.374
150	0.509±0.001	66.303±0.173	1.424±0.009	169.370±1.023
	0.512±0.001	66.620±0.173	1.423±0.009	169.156±1.023
			1.420±0.009	168.859±1.023
	0.51135±0.001	66.58±0.173	1.439±0.009	171.130±1.023
เฉลี่ย	0.511±0.001	66.502±0.173	1.427±0.009	169.628±1.023

ตารางที่ ๑.5 ค่าการดูดกลืนแสงของการศึกษาการนำโลหะหนักกลับคืน

โลหะหนัก	สารละลายที่ใช้สกัดโลหะหนัก	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
นิกเกิล		0.914±0.001
	0.1 M HNO ₃	0.915±0.001
		0.915±0.001
	เฉลี่ย	0.915±0.001
	1M HNO ₃	0.978±0.001
		0.980±0.001
		0.979±0.001
	เฉลี่ย	0.979±0.001
	0.1M NaOH	0.008±0.001
		0.007±0.001
	0.007±0.001	
เฉลี่ย	0.008±0.001	
โครเมียม	0.1 M HNO ₃	0.318±0.004
		0.324±0.004
		0.317±0.004
	เฉลี่ย	0.319±0.004
	1M HNO ₃	0.981±0.001
		0.980±0.001
		0.981±0.001
	เฉลี่ย	0.981±0.001
	0.1 M NaOH	0.040±0.001
		0.042±0.001
	0.041±0.001	
เฉลี่ย	0.041±0.001	

ตารางที่ ๑.6 ค่าการดูดกลืนแสงของการศึกษาอัตราการใช้ไฟที่เหมาะสมในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียม

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสงของนิกเกิล (Abs)			ค่าการดูดกลืนแสงของโครเมียม (Abs)		
	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)
0	0.986±0.002	1.000	0.960	1.700±0.007	1.770±0.010	1.690
	0.983±0.002	1.000	0.960	1.714±0.007	1.770±0.010	1.700
	0.983±0.002	1.000	0.960	1.708±0.007	1.760±0.010	1.700
				1.714±0.007	1.760±0.010	1.700
เฉลี่ย	0.986±0.002	1.000	0.960	1.709±0.007	1.760±0.010	1.700
0-4	0.022	0.020	0.030	N.D.	N.D.	0.060±0.010
	0.022	0.020	0.030	N.D.	N.D.	0.080±0.010
	0.022	0.020	0.030	N.D.	N.D.	0.070±0.010
				N.D.	N.D.	0.080±0.010
เฉลี่ย	0.022	0.020	0.030	N.D.	N.D.	0.070±0.010
4-8	0.016±0.001	0.010	N.D.	N.D.	1.470±0.010	1.800±0.008
	0.014±0.001	0.010	N.D.	N.D.	1.480±0.010	1.630±0.008
	0.015±0.001	0.010	N.D.	N.D.	1.480±0.010	1.660±0.008
				N.D.	1.460±0.010	1.650±0.008
เฉลี่ย	0.016±0.001	0.010	N.D.	N.D.	1.470±0.010	1.680±0.008

ตารางที่ ๑.6 ค่าการดูดกลืนแสงของการศึกษาอัตราการใช้ไฟที่เหมาะสมในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียม (ต่อ)

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสงของนิกเกิล (Abs)			ค่าการดูดกลืนแสงของโครเมียม (Abs)		
	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)
8-16	0.005±0.001	0.010	0.260±0.010	1.163±0.007	1.770±0.010	1.550±0.010
	0.004±0.001	0.010	0.270±0.010	1.166±0.007	1.770±0.010	1.580±0.010
	0.005±0.001	0.010	0.270±0.010	1.157±0.007	1.780±0.010	1.570±0.010
เฉลี่ย	0.005±0.001	0.010	0.260±0.010	1.165±0.007	1.770±0.010	1.570±0.010
	0.014±0.004	0.460	0.520±0.010	1.708±0.004	1.760±0.010	1.370±0.030
	0.013±0.004	0.470	0.530±0.010	1.702±0.004	1.760±0.010	1.430±0.030
16-24	0.007±0.004	0.460	0.530±0.010	1.710±0.004	1.770±0.010	1.440±0.030
	0.014±0.004	0.460	0.520±0.010	1.710±0.004	1.750±0.010	1.440±0.030
	0.014±0.004	0.460	0.520±0.010	1.708±0.004	1.760±0.010	1.420±0.030
เฉลี่ย	0.459±0.003	0.880	0.530±0.006	1.771±0.004	1.740±0.010	1.510±0.040
	0.463±0.003	0.890	0.620±0.006	1.764±0.004	1.740±0.010	1.400±0.040
	0.465±0.003	0.890	0.630±0.006	1.774±0.004	1.730±0.010	1.440±0.040
24-40	0.465±0.003	0.890	0.630±0.006	1.769±0.004	1.750±0.010	1.460±0.040
	0.459±0.003	0.880	0.530±0.006	1.770±0.004	1.740±0.010	1.450±0.040
	0.459±0.003	0.880	0.530±0.006	1.770±0.004	1.740±0.010	1.450±0.040
เฉลี่ย	0.459±0.003	0.880	0.530±0.006	1.770±0.004	1.740±0.010	1.450±0.040

ตารางที่ ๖.6 ค่าการดูดกลืนแสงของการศึกษาอัตราการใช้ไฟที่เหมาะสมในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียม (ต่อ)

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสงของนิกเกิล (Abs)			ค่าการดูดกลืนแสงของโครเมียม (Abs)		
	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)
40-56	0.884±0.005	0.940	0.360±0.007	1.770±0.004	1.730	1.070±0.100
	0.892±0.005	0.940	0.480±0.007	1.772±0.004	1.730	1.200±0.100
	0.894±0.005	0.930	0.490±0.007	1.76±0.004	1.720	1.280±0.100
เฉลี่ย	0.884±0.005	0.940	0.360±0.007	1.769±0.004	1.730	1.210±0.100
56-72	0.899±0.002	0.910	0.900	1.773±0.008	1.720	1.760
	0.896±0.002	0.900	0.890	1.767±0.008	1.720	1.770
	0.896±0.002	0.910	0.890	1.773±0.008	1.720	1.770
เฉลี่ย	0.899±0.002	0.910	0.900	1.767±0.008	1.720	1.770
72-96	0.928±0.002	0.950	1.010	1.726±0.003	1.660	1.770
	0.928±0.002	0.940	1.010	1.725±0.003	1.660	1.770
	0.931±0.002	0.940	1.010	1.728±0.003	1.660	1.770
เฉลี่ย	0.928±0.002	0.950	1.010	1.725±0.003	1.660	1.770

ตารางที่ ๖.6 ค่าการดูดกลืนแสงของการศึกษาอัตราการใช้ไฟที่เหมาะสมในการบำบัดนิกเกิลและโครเมียม (ต่อ)

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสงของนิกเกิล (Abs)			ค่าการดูดกลืนแสงของโครเมียม (Abs)		
	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)	(มล./นาที)
96-120	0.945±0.002	0.930	0.990	1.728±0.005	1.650±0.010	1.770
	0.948±0.002	0.940	0.990	1.737±0.005	1.650±0.010	1.770
	0.944±0.002	0.940	0.990	1.727±0.005	1.660±0.010	1.770
				1.724±0.005	1.670±0.010	1.770
เฉลี่ย	0.945±0.002	0.930	0.990	1.729±0.005	1.660±0.010	1.770
120-144	0.968±0.003	0.940	0.970	1.723±0.010	1.650±0.010	1.780
	0.974±0.003	0.940	0.970	1.705±0.010	1.660±0.010	1.790
	0.973±0.003	0.940	0.970	1.713±0.010	1.670±0.010	1.790
				1.701±0.010	1.650±0.010	1.790
เฉลี่ย	0.968±0.003	0.940	0.970	1.711±0.010	1.660±0.010	1.790
144-168	0.963±0.004	0.900	1.000	1.710±0.006	1.630±0.010	1.740
	0.965±0.004	0.900	1.000	1.720±0.006	1.640±0.010	1.740
	0.970±0.004	0.910	1.000	1.724±0.006	1.650±0.010	1.740
			1.000	1.723±0.006	1.640±0.010	1.750
เฉลี่ย	0.963±0.004	0.900	1.000	1.719±0.006	1.640±0.010	1.740

ภาคผนวก ข.

ภาพการทดลอง

1. การเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชน



ภาพที่ ข.1 ป้อนเก็บน้ำเสีย

ภาพที่ ข.2 การฟีกตัวอย่างน้ำเสีย



ภาพที่ ข.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น

ภาพที่ ข.4 การเก็บรักษาตัวอย่าง

2. การทำถ่านกัมมันต์



ภาพที่ ข.5 การกระตุ้นถ่านด้วยการเผา ภาพที่ ข.6 การล้างถ่านด้วย H_2O_2

3. การศึกษาขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยเครื่อง BET

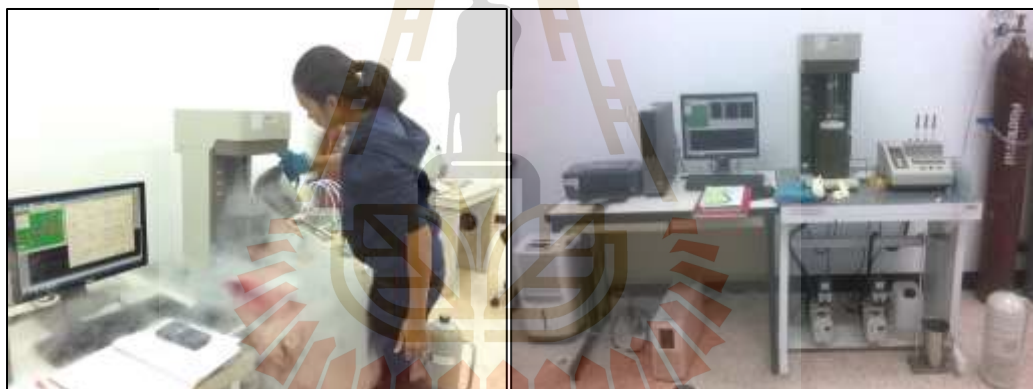


ภาพที่ ข.7 การชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์

ภาพที่ ข.8 ไนโตรเจนเหลว



ภาพที่ ข.9 การ degassesภาพที่ ข.10 เอาตัวอย่างเข้าเครื่องวิเคราะห์



ภาพที่ ข.11 การเติมไนโตรเจนเหลว ภาพที่ ข.12 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Saeuang, K., Potivichayanon, S., and Rattanaphanee, P. (2018). **Adsorption of Nickel and Chromium from synthetic wastewater by activated carbon derived from waste rubber tires.** The 5 th EnvironmentAsia International Conference, June, 13-15, 2019, Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand.



Proceedings on the 5th EnvironmentAsia International Conference
13-15 June 2019, Convention Center, The Enpress Hotel, Chiang Mai, Thailand

Adsorption of Nickel and Chromium from synthetic wastewater by activated carbon derived from waste rubber tires

Ketkanok Saeuang¹, Siraporn Potivichayanon^{2*}, and Panarat Rattanaphanee³

¹Environmental Pollution and Safety Program

^{1,2*}School of Environmental Health,

Institute of Public Health, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand

³School of Chemical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand;

Corresponding author: e-mail: sirapom@sut.ac.th

ABSTRACT

The objectives of this research were to investigate physicochemical properties of activated carbon derived from waste rubber tires or carbon black and the optimum conditions of nickel and chromium adsorption. The physicochemical properties were structure morphology, texture, and adsorption capacity. The structure morphology and compositional analysis were observed by a field emission scanning electron microscope with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer. The results showed the porous structure of activated carbon was changed and increased when compared with carbon black. The energy dispersive X-ray fluorescence spectrum showed carbon more than 80%. Brunauer Emmett Teller has characterized the textural property of activated carbon. It was found that surface area and total pore volume were improved to 149.74 m²/g and 1.05 cm³/g, respectively. This total pore volume was in mesoporous. The adsorption capacity can be studied by iodine number and density appears. Iodine number results showed activated

carbon absorbed iodine solution up to 1,506 mg/g and density appears results revealed at 0.73 g/cm³. After that, the optimum conditions were studied with mixed aqueous solution containing 10 mg/l of nickel and 10 mg/l of chromium, pH 5, 30 min of contact time and 3 g of adsorbent dosage. Nickel and chromium were absorbed more than 50% and 99.99% of efficiency, respectively. In addition, this adsorption process could be proved by Langmuir model with correlation coefficient of nickel and chromium at 0.94 and 0.99, respectively.

Keywords: Carbon black, Activated carbon, Adsorption, Waste rubber tires, Heavy metals

INTRODUCTION

The rapid development of Thailand industry has led to problems of water pollution because water is important for process productions. Industrial wastewater plating is one of the key factors due to it has heavy metals contamination. The important toxic metals are Ni, Cr, Cd, Pb and Zn, etc. Nickel and chromium are the best to use for electroplating industry which are toxic to human's health and the environment (Gonsalvesh et al., 2016). Heavy metal toxicity affects the nervous system, lungs, kidney and liver (Lata et al., 2014). Different methods were used to wastewater treatment. However, adsorption

method is considered as an efficient and universal method of wastewater treatment with the guidelines of WHO and EPA. This is because of its cost effectiveness and easy to manage (Fu and Wang, 2011).

Waste rubber tires have been a major disposal problem. Some of tires were look up to landfill spaces and pyrolysis process in industry (Williams, 2013; Safeh and Gupta, 2014). Recently, waste rubber tire from pyrolysis process is an alternative that it was used as an absorbent because waste rubber tires are low costs and high amount of carbon which were called activated

carbon (Williams, 2013; Hadi et al., 2016; Saleh and Gupta, 2014) after either physical or chemical activation methods.

Consequently, the waste rubber tire is an interesting source of raw materials for the preparation of activated carbon (Gupta et al., 2013) which it has been applied to wastewater treatment in the adsorption of heavy metals (Gupta et al., 2013; Karunarathne and Amarasinghe, 2013; Saleh et al., 2013; Acosta et al., 2016).

The objectives of the present study were to investigate the physicochemical property of activated carbon. The physical properties were included morphology and texture. The chemical property were included iodine number and density appears and optimum condition of nickel and chromium adsorption.

METHODOLOGY

1 Preparation of adsorbent

Activated carbon was prepared from waste rubber tires via pyrolysis of petroleum tire industry. It was called carbon black. Carbon black was treated with 6% of hydrogen peroxide solution to oxidize organic at 60°C for 24 hrs. Then, it was washed with deionized water and dried at 105°C for 4 hrs. The dried material was activated at 900°C for 2 hrs by heating in muffle furnace (CARBOLITE/Control 201), cooled in desiccator and stored in desiccator.

The material was treated with 1 M of hydrochloric solution to remove the ash content and washed with deionized water and dried at 105°C and then cooled in desiccator. The final product was called activated carbon (Gupta et al., 2012).

2 Physicochemical properties

2.1 Physical properties

Morphology

The morphology of adsorbent was studied by a field emission scanning electron microscope (FE-SEM, Carl Zeiss, AURIGA) with energy

dispersive X-ray spectroscopy (EDX) for compositional analysis. It was analyzed the composition presented in carbon black and activated carbon (Gupta et al., 2012).

Texture

The surface area and pore volume of the adsorbents were determined by N_2 gas adsorption isotherm at $-196^\circ C$ (77 K). The adsorption and desorption isotherms were studied with Brunauer Emmett Teller (BET, Bel sorp mini 11, Bel-Japan, Japan). The carbon black and activated carbon were degassed for 6 hrs at $300^\circ C$ (Gonsalvesh et al., 2016) and analyzed for 24 hrs.

2.2 Chemical properties

Adsorption capacity:

Iodine number

The activated carbon was dried at $105^\circ C$ for 1 hr and weighed 0.5 g in each Erlenmeyer flask. Then, 10 ml of 5% HCl solution was added and boiled for 30 sec. The sample flasks were added with 100 ml of 0.1 N iodine solution and shaken for 30 sec. All samples were filtered with filter paper No. 42. After that, 50 ml of the

sampler was taken in a flask and titrated with 0.1 N sodium thiosulfate solution, added a few drop of the starch indicator solution and continued the titration with 0.1 N sodium thiosulfate solution.

Record the volume of sodium thiosulfate used (ASTM, 1986). The experiment was done in triplicate.

Density appears

The carbon black and activated carbon were placed in each cylinder, tapped several times until constant volume at 1 cm^3 and then weighed. These was calculated as the ratio of the weight sample to its volume and expressed in g/cm^3 (Baccar et al., 2009).

3 Optimum conditions

The Erlenmeyer flasks containing 3, 5 and 10 g of activated carbon were added to 100 ml of mixed aqueous solutions containing 10 mg/l of nickel and 10 mg/l of chromium and the pH was adjust to 2, 4 and 5 with 1 M NaOH and 1 M H_2SO_4 solution and shaken for 30, 60, 90, 120 and 150 min at 150 rpm. All experiments were conducted at room temperature.

The final was analyzed by atomic absorption spectroscopy (AAS, analytik jena, nova AA).

The removal efficiency of nickel and chromium were calculated by Eq. (1) (Mousavi et al., 2010)

$$\% \text{Removal} = ((C_i - C_e) / C_i) \times 100 \quad (1)$$

Where C_i and C_e are the initial and equilibrium concentrations in mg/l, respectively. The nickel and chromium adsorption capacity Q_e (mg/g) was calculated by Eq. (2) (Gonsalvesh et al., 2016; Karunarathne and Amarasinghe, 2013).

$$Q_e = ((C_i - C_e) / W) \times V \quad (2)$$

Where V is the volume of solution in L. W is the weight of adsorbent in g.

4 Adsorption isotherm

The adsorption isotherm was performed with different concentrations at 5, 10, 30, 50, 100, 200 and 250 mg/l of mixed aqueous solutions under the optimum conditions from the previous experiments. These studies were controlled at room temperature. Batch isotherm experiments using 100 ml of mixed aqueous solutions

were done in Erlenmeyer flask and shaken at 150 rpm for 30 min of a contact time. All samples were analyzed for concentration of nickel and chromium by AAS to study Langmuir and Freundlich isotherm.

Langmuir isotherm was calculated by Eq. (3) (Mousavi et al., 2010; Karmacharya et al., 2016).

$$C_e / Q = (1 / (Q_0 \times b)) + (C_e / Q_0) \quad (3)$$

Where C_e is the equilibrium concentration (mg/l), Q is the amount of heavy metals sorbed, b is the sorption constant which is related to the affinity of the sorbate to the sorbent (l/mg), Q_0 is the maximum sorption capacity (mg/g).

Freundlich isotherm was calculated by Eq. (4,5 or 6) (Mousavi et al., 2010; Karmacharya et al., 2016).

$$q_e = x/m = K_f C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$Q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (5)$$

$$\text{or } \log q_e = \log K_f + 1/n \log C_e \quad (6)$$

Where K_f and n are the Freundlich constants related to the adsorption

capacity and adsorption intensity, respectively. The intercept and the slope of the linear plot of $\ln q_e$ versus $\ln C_e$ at given experimental conditions provide the values of K_f and $1/n$, respectively.

5. Chemicals

All chemicals used (HNO_3 , $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, H_2O_2 , HCl , H_2SO_4 , NaOH , I_2 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$ and $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_6$) were analytical grade. Solutions were prepared by dissolving the corresponding reagent in distilled water. All experiments were done in triplicate.

RESULTS AND DISCUSSION

1 Physical properties

Morphology

The FE-SEM was employed to visualize carbon black and activated carbons morphology and porous structure (Gupta et al., 2012, 2013). The image exhibits two distinct morphologies. One of the carbon black are large porous structure and unregulated, as presented in Figure 1 that there are organic substances on the surface which effect to adsorption

(Williams, 2013) and activated carbons are small porous structure when compared with carbon black (Figure 2). This may be due to the activated carbons developed by heating from the preparation that made the pore structural changes in the adsorbent. Consequently, the porous structure of activated carbon was increased after the activation which was related with the property of adsorbent. In addition, an EDX analysis was used to analyze component of the carbon black and activated carbon as shown in Table 1. It was presented the main components of carbon, oxygen, sulfur whereas there was not nickel and chromium (Figure 3). These results also showed more than 80% of dominant carbon that corresponds to the properties of the raw materials for activated carbon production (Gupta et al., 2012; Williams, 2013) which generally activated carbon from waste rubber tires have in the range of 70-90% of carbon components (Gupta et al., 2012, 2013; Saleh and Danmaliki, 2016)

Proceedings on the 5th EnvironmentAsia International Conference
13-15 June 2019, Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand

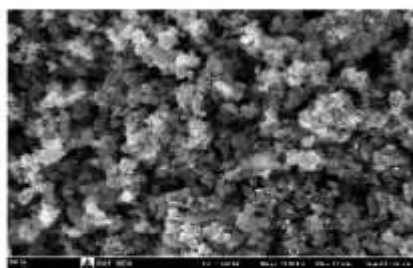


Figure 1 FE-SEM image of Carbon black 20000 kx

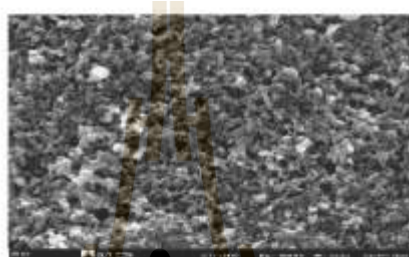


Figure 2 FE-SEM image of Activated carbon 20000 kx

Table 1 Energy dispersive X-ray analysis (EDX) quantitative microanalysis of carbon black and activated carbon

Absorbents	Weight%		
	C	O	S
Carbon black	84.01	2.54	3.38
Activated carbon	83.51	4.68	3.07

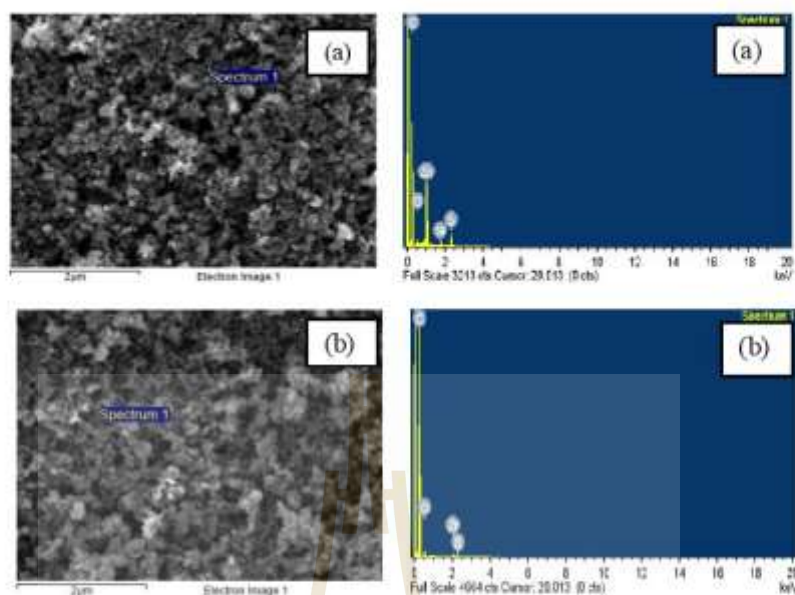


Figure 3 Example of EDX image, carbon black (a) and activated carbon (b)

Texture

The carbon black and activated carbon were analyzed by BET. The parameters of BET were summarized in Table 2. The results were presented about increasing surface area and total pore volume of activated carbon after activation when compare with carbon black and then refer to the adsorption was increased when the

surface area and total pore volume were also increased (Saleh and Danmaliki, 2016; Williams, 2013) . The mean pore diameter of activated carbon was called mesoporous because the value is in the range of 20-50 nm which is suitable for adsorption liquid phase (Bansal et al., 2005).

Table 2 Physical properties of the adsorbent

Adsorbents	Surface area (m²/g)	Total pore volume (cm³/g)	Pore diameter (nm)
Carbon black	58.37	0.54	37.30
Activated carbon	149.74	1.05	27.99

2 Chemical properties

Adsorption capacity

Iodine number

The iodine number of carbon black and activated carbon were summarized in Table 3. It revealed that the activated carbon was in the standard values which presented more than 600 mg/g (Ministry of industry, Thai industrial standards institute, 2004). Consequently, the activated carbon has many small porous (Baccar et al., 2009) and adsorption tends to increase (Printhom, 2008) because the atomic structure of activated carbon was destroyed by heating that it was causing space or porous (Hadi et al., 2016).

Density appears

The density appears is one of the properties in the standard values. The density appears of activated carbon showed the decreasing value as shown in Table 3 because the atomic structure was destroyed by heating (Hadi et al., 2016; Williams, 2013). Furthermore, the adsorption will increase with the density appears decrease (Chuachan, 2013). When compared with the standard values in the range of 0.2-0.75 g / cm³, it was also found that the activated carbon was in Thailand's standard (Ministry of industry, Thai industrial standards institute, 2004). In addition, the general commercial activated carbon has a range density appears of 0.38-0.74 g/cm³. Consequently, the activated carbon from waste rubber

tires also has density appears similar to commercial activated carbon. Therefore, this activated carbon can be produced as an adsorbent for treatment dye, organic matter and heavy metals in wastewater (Saleh and Gupta, 2014; Acosta et al., 2016).

Table 3 Adsorption capacity

Absorbents	Iodine number (mg/g)	Density appears (g/cm ³)
Carbon black	371.84	0.80
Activated carbon	1,506.13	0.73

3 Optimum conditions

Effect of pH

The pH is one of the important factors for adsorption process. These experiments were carried out at pH 2, 4 and 5 in mixed aqueous solution containing 10 mg/l of Ni and 10 mg/l of Cr. The optimum pH for adsorption was 5 because Ni and Cr can be adsorbed on the surface of activated carbon which some of the efficiency was more than 50% and 99.99%, respectively (Table 4). It may be due to the proton of solution (H^+ or H_3O^+) which increase with decreasing of pH (Langmuir, 1997) and also is high as compared with ions of nickel (Ni^{2+})(Gupta et al., 2013) and chromium (Cr^{3+} , $Cr(OH)^{2+}$ or $Cr(OH)_2^+$)(Gonsalvesh et al., 2016)at pH 2 and 4. It competed in binding during adsorption with ions of metals for surface active sites of the adsorbent which has negative charge (Bansal et al., 2005; Gonsalvesh et al., 2016; Saleh et al., 2013; Gupta et al., 2013; Langmuir, 1997)

Table 4 Adsorption of nickel and chromium

Heavy metals	pH	Final concentration after adsorption (mg/l)	Removal efficiency (%)
Ni	2	7.84±0.09	19.36±0.89
	4	6.17±0.01	36.50±0.07
	5	4.84±0.26	50.17±2.64
Cr	2	5.15±0.99	43.92±1.08
	4	N.D.	100±0.00
	5	N.D.	100±0.00

N.D. is heavy metal concentration are lower than detection limit (<0.01 mg/l)

Effect of contact time

The effect of contact time were studied at 30, 60, 90, 120 and 150 min. The activated carbon at 3g could effectively adsorb Ni and Cr within the first 30 min with more than 50% and 99.99% of efficiency, respectively. This rapid uptake can be explained by the creation of more active sites on the surface of the activated carbon by the activation process during preparation of activated carbon from waste rubber tires. After 30 min, the removal efficiency was stable which the activated carbon could not adsorb nickel and chromium. Furthermore, the optimum contact time might

depend on the adsorbent dosage and also the concentration of heavy metals in solution (Karmacharya et al., 2016; Gupta et al., 2013).

Effect of adsorbent dosage

The removal efficiency of nickel was increased when the adsorbent dosage increased from 3 to 5 g (Figure 4) due to the resulting in more surface area to adsorb (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005) and stable when the activated carbon was increased from 5 to 10 g because the adsorption into the equilibrium state. The removal efficiency of Cr was very high that presented more than 99.99% in all experiments and showed the removal

efficiency was not different because 3 g of activated carbon may be almost adsorb Cr due to having more surface area. The activated carbon could adsorb Cr better than Ni at 3, 5 and 10 g. However, the optimum of adsorbent dosage at 3 g was used for further experiment for isotherm study to reduce the use of activated carbon.

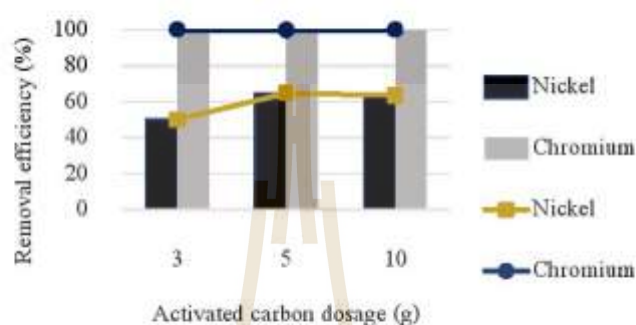


Figure 4 Effect of adsorbent dosage on the amount of Ni, Cr adsorbed on the activated carbon, (conditions: contact time = 30 min, and Ni and Cr concentration = 10 mg/l)

4 Adsorption isotherm of adsorption system was explanation The equilibrium adsorption with Langmuir and Freundlich isotherms of Ni and Cr onto the adsorption models (Gonsalvesh et al., activated carbon adsorbent were 2016). The results of their linear investigated with the different regressions as presented in Table 5. concentrations at 5, 10, 30, 50, 100, The correlation coefficients (R^2) 200 and 250 mg/l in mixed aqueous obtained from the plots of Langmuir solution under the optimum condition ($1/q_e$ vs $1/C_e$) as show in Fig. 5 and 6. at pH 5 in presence of 3 g of These revealed that the adsorption adsorbent and 30 min of contact time. was the best fit in Langmuir The important reason of the analysis adsorption model with R^2 . Therefore,

Ni and Cr was adsorbed onto the activated carbon surface by homogeneous. The Langmuir isotherm can be explained in four assumptions which include 1 adsorption occurs at a definite site on the surface, 2 one site can bind only one molecule of solution, 3 the energy of adsorption all site is the same and 4 it have no forces of interaction (Cecen et al., 2012; Bansal et al., 2005; Langmuir, 1997).

Table 5 The values of correlation coefficient in various isotherm

Heavy metals	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	Q ₀ (mg/g)	b (l/mg)	R ²	K _r (g/mg)	1/n	R ²
Nickel	4.3956	0.0508	0.9414	0.3902	0.4845	0.7713
Chromium	4.1000	1.3897	0.9938	0.4793	0.5058	0.7416

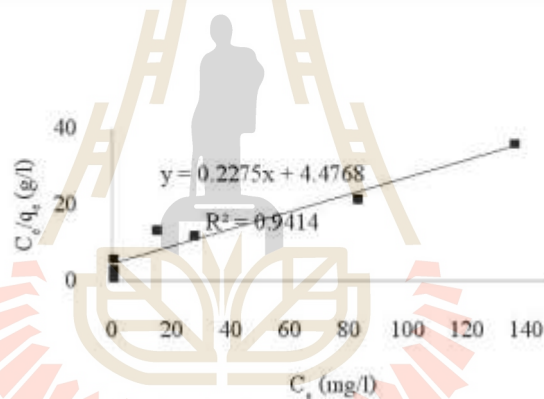


Figure 5 Langmuir adsorption isotherm of Ni

Proceedings on the 5th EnvironmentAsia International Conference
13-15 June 2019, Convention Center, The Engrpass Hotel, Chiang Mai, Thailand

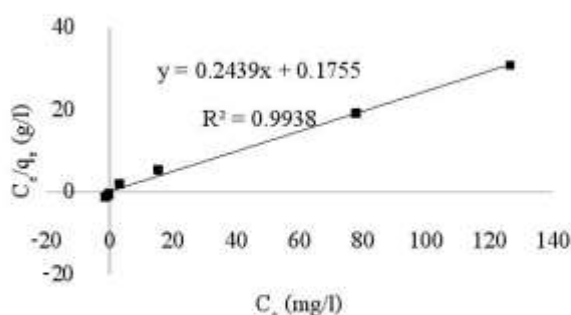


Figure 6 Langmuir adsorption isotherm of Cr

CONCLUSIONS

The activated carbon prepared from waste rubber tires were developed for nickel and chromium adsorption in synthetic wastewater to study the physicochemical properties and the optimum conditions. The activated carbon has properties according to the standard. The optimum parameters revealed at pH 5, 30 min of contact time and 3 g of activated carbon dosage. The adsorption isotherm was Langmuir isotherm. In addition, the removal efficiencies of nickel and Chromium were more than 50% and 99.99%, respectively under the optimum conditions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported and funded by petroleum tire industry, national science and technology development agency (NSTDA) and Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

- American Society for Testing and, Materials. 1986. "Standard test method for determination of iodine number of activated carbon". Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.
- Acosta, R., Fierro, V., Martinez de Yuso, A., Nabarlatz, D., and Celzard, A., 2016. "Tetracycline adsorption onto activated carbons produced by KOH activation of tyre pyrolysis char". *Chemosphere* 149 168-176.

- Bansal, R. C., and Goyal, M., 2005. Activated carbon adsorption. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Baccar, R., Bouzid, J., Feki, M., and Montiel, A., 2009. "Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions", *Journal of hazardous materials* 162 1522-1529.
- Cecen, F., and Aktas, O., 2012. Activated carbon for water and wastewater treatment. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr.
- Chuachan K., 2013. Effect of carbonization temperature on the properties of charcoal and activated carbon from coconut shell. A thesis for the degree of Master of Chemical Engineering. Suranaree University of Technology.
- Fu, F., and Wang, Q., 2011. "adsorption efficiency of heavy metal ions from wastewaters: A review", *Journal of Environmental Management* 92 407-418.
- Gupta, V. K., Ganjali, M.R., Nayak, A., Bhushan, B., and Agarwal, S., 2012. "Enhanced heavy metals removal and recovery by mesoporous adsorbent prepared from waste rubber tire", *Chemical Engineering Journal* 197 330-342.
- Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Siddiqui, M. N., and Agarwa, S. 2013. "Chromium removal from water by activated carbon developed from waste rubber tires", *Environmental Science Pollution* 20:1261-1268.
- Gonsalvesh, L., Marinov, S. P., Gryglewicz, R. Carleer, and J. Yperman, 2016. "Preparation characterization and application of polystyrene based activated carbon for Ni (II) removal from aqueous solution", *Fuel Processing Technology* 149 75-85.
- Hadi, P., Yeung, K. Y., Guo, J., Wang, H., and McKay, G., 2016. "Sustainable development of tyre char-based activated carbons with different textural properties for value-added applications", *Journal of Environmental Management* 170 1-7.
- Karunaratne, H.D.S.S., and Amarasinghe, B.M.W.P.K., 2013. "Fixed bed adsorption column studies for the removal of aqueous phenol from activated carbon prepared from sugarcane bagasse", *Energy Procedia* 34 83-90.
- Karnacharya M.S., Gupta, V. K., Tyagi I., Agarwal, S., and Jha, V. K., 2016. "Removal of As (III) and As (V) using rubber tire derived activated carbon modified with alumina composite", *Journal of molecular liquids* 216 836-844.
- Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Lata, S., Singh, P.K., and Samadder, S.R., 2014. "Regeneration of adsorbents and

- recovery of heavy metals: a review", *J. Environ. Sci. Technol.*, pp. 1461-1478.
- Lenia, G., Stefan P. M., Grazyna G., Robert C. and Jan Y. 2016. Preparation, characterization and application of polystyrene based activated carbons for Ni(II) removal from aqueous solution. *Fuel Processing Technology*. 149 75-85
- Ministry of industry, 2004. "Office of Industrial Product Standards", Standard of Industrial Activated Carbon Product TIS 900-2004.
- Mousavi, H. Z., Housseynifar, A., Jahed, V., and Dehghani, S. A. M., 2010. "Removal of Lead from aqueous solution using waste tire rubber ash as an adsorbent", *Brazilian Journal of Chemical Engineering* (79-87).
- Printhorn T., 2008. Preparation and analysis of specific characteristics of activated carbon from bamboo tong and bamboo dog. Master of Science Thesis (Chemistry). Kasetsart University.
- Saleh, T. A., Gupta, V. K., and Al-Saadi, A. A., 2013. "Adsorption of lead ions from aqueous solution using porous carbon derived from rubber tires: Experimental and computational study", *Journal of Colloid and Interface Science* 396 264-269.
- Saleh, T. A., and Gupta, V. K., 2014. "Processing methods characteristics and adsorption behavior of tire derived carbons: A review", *Advances in Colloid and Interface Science* 211 93-101.
- Saleh, T. A., and Gaddafi I. Danmaliki, 2016. "Influence of acidic and basic treatments of activated carbon derived from waste rubber tires on adsorptive desulfurization of thiophenes", *Journal of Taiwan institute Chemical engineers* 60 460-468.
- Williams, T., 2013. "Pyrolysis of waste tyres: A review", *Waste Management* 33 1714-1728.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเกศกนก แซ่อึ้ง เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535 เริ่มเรียนชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนตำบลโคกกรวด ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโคราชพิyakม อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขานาอมัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 และหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

