

การดูดซับ 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรนบนกราฟีนออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยอนุภาคที่มีสมบัติ
ซูเปอร์พาราแมกเนติก



นายพนัทร เกิดสมุทร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Adsorption of 17- α methyltestosterone on modified graphene oxide
with superparamagnetic particle

Mr. Panapatt Kerdsamut



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับ 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรนบนกราฟีน
ออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พารา
แมกเนติก

โดย

นายพนภัทร เกิดสมุทร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. ภาณุ หงษ์สวัสดิ์)

พจนัทร เกิดสมุทร : การดูดซับ 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรนบนกราฟีนออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Adsorption of 17- α methyltestosterone on modified graphene oxide with superparamagnetic particle) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล, 116 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลการดูดซับ 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน (MT) เชิงเดี่ยวและแบบผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์ (DOM) ด้วยตัวกลางดูดซับ กราฟีนออกไซด์ (GO) อนุภาคแมกเนติก (SP) กราฟีนออกไซด์ ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา (SiO_2 -SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและทำการดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา (NH_2 - SiO_2 -SP) และ กราฟีนออกไซด์ ที่ต่อติดกับอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและทำการดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา (GO- NH_2 - SiO_2 -SP) ผลการดูดซับ MT พบว่า GO และ GO- NH_2 - SiO_2 -SP เหมาะสมกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน ส่วน GO-SP เหมาะสมกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน ซึ่งตัวกลางดูดซับทั้งสามชนิดข้างต้นสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สมดุลภายใน 10 นาที ส่วน SP ไม่สามารถดูดซับ MT ได้ จึงไม่เหมาะสมต่อสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 และ อันดับที่ 2 เสมือน ไอโซเทอมการดูดซับพบว่าตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO- NH_2 - SiO_2 -SP เหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ผลกระทบจากการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO-SP และ GO- NH_2 - SiO_2 -SP พบว่าเกิดจากผลของ SP ที่เข้าไปบดบังและแทรกบนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ การศึกษาผลจากการดูดซับ MT แบบผสมบนตัวกลางดูดซับพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ MT สูงขึ้นเนื่องจาก DOM ที่มาเกาะติดบนผิวของตัวกลางดูดซับ จะทำการดูดซับกับ MT บริเวณใกล้เคียง การศึกษาการดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นต่ำระดับ ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่า กราฟีนออกไซด์ มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ลดลงเนื่องจากการเกาะเป็นกลุ่มก้อนของกราฟีนออกไซด์ เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO-SP และ GO- NH_2 - SiO_2 -SP มีประสิทธิภาพสูงกว่าสำหรับการแยกตัวกลางดูดซับด้วยแผ่นแม่เหล็กพบว่าตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติกเกิดการหลุดออกเมื่อผ่านการ อัลตราโซนิก ส่วนตัวกลางดูดซับ GO- NH_2 - SiO_2 -SP ที่ผ่านการอัลตราโซนิกไม่พบการหลุดของกราฟีนออกไซด์เนื่องจากการต่อติดหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่าง GO กับ SiO_2 -SP มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5670526221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: 17- α METHYLTESTOSTERONE; ADSORPTION; GRAPHENE OXIDE; SUPERPARAMAGNETIC PARTICLE

PANAPATT KERDSAMUT: Adsorption of 17- α methyltestosterone on modified graphene oxide with superparamagnetic particle. ADVISOR: ASSOC. PROF. PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 116 pp.

In this study, adsorption efficiency of 17-alpha methyl testosterone (MT) in single solute and mixed solute with dissolved organic carbon (DOC) by various adsorbents, graphene oxide (GO), magnetic particle (SP), modified GO by attached GO with magnetic particle (GO-SP), silica coated magnetic particle (SiO₂-SP), magnetic particle with amino substituted modified silica (NH₂-SiO₂-SP) and graphene oxide modified magnetic particle with amino grafted silica (GO-NH₂-SiO₂-SP). The results indicated that the adsorption of MT on GO and GO-NH₂-SiO₂-SP can describe by pseudo 2 order but GO-SP can described by pseudo 1 order. These three adsorbents can adsorbed MT rapidly in first 10 minutes. SP cannot adsorb MT. Adsorption isotherm of GO, GO-SP and GO-NH₂-SiO₂-SP was well described by Langmuir isotherm. In mixed solute, the coexisting DOC can enhance the adsorption capacity of MT by multilayer adsorption between DOC and MT. Adsorption of MT in low concentration ($\mu\text{g/L}$) found that GO that attached on GO-SP and GO-NH₂-SiO₂-SP had higher MT adsorption capacity than free GO. This might be caused by the agglomeration of free GO sheet. In magnetic separation. It was found that GO attached on GO-SP can be released after ultrasonic. However, GO attached on GO-NH₂-SiO₂-SP was not released after ultrasonic. The grafted amino group on GO-NH₂-SiO₂-SP might enhance the strength of bonding between GO and NH₂-SiO₂-SP.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะและถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างมีแบบแผน ตลอดจนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนิจ อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และ ดร.ภาณุช หงษ์สวัสดิ์ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณพี่ รามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สเตียรอยด์ฮอร์โมน	5
2.1.1 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (17 α -Methyltestosterone, MT).....	5
2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (MT)	6
2.1.3 พิษวิทยาของ 17 แอลฟาเมธิลเทสโทสเตอโรน	7
2.2 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM)	8
2.3 การดูดซับ	10
2.3.1 หลักการของการดูดซับ.....	10
2.3.1.1 แรงทางกายภาพ.....	10
2.3.1.2 แรงทางเคมี (Chemical force).....	11
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ.....	11

2.3.3 กลไกการดูดซับ	12
2.3.4 ขั้นตอนการดูดซับ	13
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	14
2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetic).....	15
2.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	16
2.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm).....	16
2.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm).....	17
2.5.3 ไอโซเทอมการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koblecorrigan's isotherm).....	18
2.6 การแยกด้วยแม่เหล็กแรงสูง (HGMS).....	18
2.6.1 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic strength field).....	18
2.6.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density).....	18
2.6.3 แรงแม่เหล็ก (Magnetic force).....	19
2.6.4 แรงดึงดูดของโลก (Gravity force).....	19
2.6.5 แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal force).....	20
2.7 เทคนิคการสกัดเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (Solid phase extraction, SPE).....	20
2.8 ตัวกลางดูดซับ.....	21
2.8.1 อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก.....	21
2.8.2 กราฟีน.....	22
2.8.2.1 วิธีในการสังเคราะห์กราฟีน.....	25
2.8.2.2 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ.....	27
2.9 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	28
2.9.1 โครงสร้างผลึก.....	28
2.9.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	28

2.9.3 ลักษณะพื้นที่ผิว	28
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.10.1 การกำจัด MT	29
2.10.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ	33
2.10.3 ความเป็นพิษและการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT	37
2.10.4. สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัย	41
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย	43
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	43
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์	43
3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์	43
3.1.3 สารเคมี	44
3.2 การทดลอง.....	44
3.2.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ.....	46
3.2.1.1 สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO)	46
3.2.1.2 การสังเคราะห์ อนุภาคแมกเนติก (magnetic nano particle, SP)	46
3.2.1.3 กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) ด้วยวิธี Co-precipitation.....	47
3.2.1.4 การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา (SiO ₂ -SP)	47
3.2.1.5 การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและทำการดัดแปลงหมู่ อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา (magnetic silica amino-silane particles) (NH ₂ -SiO ₂ -SP).....	48
3.2.1.6 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติกที่เคลือบ ด้วยซิลิกาและทำการดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา (GO-NH ₂ - SiO ₂ -SP)	48

3.2.2	ศึกษาทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับและมลสารที่ดูดซับ	49
3.2.2.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	49
3.2.2.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิว	49
3.2.2.3	การวิเคราะห์พื้นที่ผิว	49
3.2.2.4	การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวด้วยการวิเคราะห์โดยการไทเทรตกรด-เบส ..	49
3.2.3	การสังเคราะห์ และตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์	50
3.2.3.1	เทคนิคการ Pre-concentration ด้วย Solid phase extraction (SPE)	50
3.2.3.2	การวิเคราะห์ด้วย high performance liquid chromatography (HPLC-DAD).....	50
3.2.4	ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ MT.....	51
3.2.5	ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของ MT	52
3.2.6	ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา	53
3.2.7	การดูดซับแบบผสมในกรณีมี MT อยู่ร่วมกับ DOC ในน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา.....	54
3.3	ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ด้วยแม่เหล็ก	54
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	55
4.1	การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	55
4.1.1	โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับ	55
4.1.2	ปริมาณกราฟีนออกไซด์	56
4.1.3	พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน	57
4.1.4	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ	57
4.1.5	การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ.....	59
4.1.6	การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวและการกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)	60
4.2	ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อความสามารถในดูดซับ.....	62

4.2.1 ผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ.....	62
4.2.2 การศึกษาโมเดลทางจลนพลศาสตร์	63
4.2.3 การแพร่ภายใน.....	64
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (MT) (ผลจากความเข้มข้น).....	65
4.4 การศึกษากระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	71
4.5 การศึกษากระบวนการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์.....	71
4.6 การศึกษากระบวนการดูดซับ MT แข็งเดี่ยวและแบบผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์ในระดับความเข้มข้น ไมโครกรัมต่อลิตร	76
4.6.1 การสกัดความเข้มข้นด้วย Solid phase extraction (SPE).....	76
4.6.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นระดับไมโครกรัมต่อลิตร	76
4.7 ประสิทธิภาพในการแยกออกด้วยแผ่นแม่เหล็ก	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก HPLC โครมาโตแกรมของ MT และ DOC	93
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐาน	96
ภาคผนวก ค 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน.....	105
ภาคผนวก ง การศึกษากระบวนการดูดซับ.....	107
ภาคผนวก จ HPLC โครมาโตแกรมของ MT จากกระบวนการ Solid phase extraction (SPE) ...	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	116

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	แสดงแนวโน้มของ MT ที่ถูกดูดซับละลายในน้ำและในดินหรือตะกอนอินทรีย์	7
ตารางที่ 2.2	ความเข้มข้นของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกลุ่มตัวอย่างที่มีการใช้ MT และกลุ่มควบคุม....	7
ตารางที่ 2.3	การจำแนกกลุ่มสารที่อาจเป็นสารก่อมะเร็ง.....	8
ตารางที่ 2.4	ปริมาณความเข้มข้นของ MT ในแหล่งน้ำต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.5	แสดงความแตกต่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	12
ตารางที่ 2.6	แสดงข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการแยกสารปนเปื้อนออก	21
ตารางที่ 2.7	แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก	21
ตารางที่ 2.8	แสดงหมู่ฟังก์ชันและพีเอชที่จุดสมมูลของตัวกลางดูดซับ.....	30
ตารางที่ 2.9	เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับ SBA-15 และ A-SBA-15 จาก FTIR	35
ตารางที่ 2.10	แสดงค่า 2α จากการตรวจวัดด้วย XRD.....	36
ตารางที่ 2.11	แสดงหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนตัวกลางดูดซับ	36
ตารางที่ 2.12	แสดงการออกแบบการทดลองเพื่อแสดงการคงอยู่และฤทธิ์ของแอนโดจินิกที่ ตกค้างในน้ำ.....	39
ตารางที่ 2.13	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
ตารางที่ 3.1	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของ MT.....	52
ตารางที่ 3.2	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสมดุลการดูดซับของ MT	53
ตารางที่ 4.1	ปริมาณร้อยละของกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ชนิดต่างๆ.....	57
ตารางที่ 4.2	พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด	57
ตารางที่ 4.3	ค่า pH_{zpc} ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด	59
ตารางที่ 4.4	ค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ของการดูดซับ MT บนตัวกลางที่มีความเข้มข้นสูง (MT 15 ppm)	64

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการดูดซับจาก Langmuir และ Freundlich isotherm model	67
---	----



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ 17- α methyltestosterone และ Testosterone.....	6
รูปที่ 2.2 Natural organic matter.....	9
รูปที่ 2.3 (a) โครงสร้างสองมิติของกราฟีนที่แสดงถึงแผ่นคาร์บอนหกเหลี่ยมมาต่อกัน	23
รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึง Electronic band ของกราฟีนแบบชั้นเดียว	23
รูปที่ 2.5 แสดงภาพถ่ายของ High resolution transmission electron microscopy (HRTEM)	26
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์แผ่นกราฟีนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio frequency, RF).....	26
รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของ PACs : (a) Salicylic acid (b) Acetylsalicylic acid (c) Atenolol และ (d) diclofenac-Na.....	32
รูปที่ 2.8 แสดงการบำบัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน (Conventional process).....	32
รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการดูดซับของ BPA บนซิลิกาชนิดรูพรุน และกราฟีนออกไซด์....	33
รูปที่ 2.10 การต่อหมู่อะมิโนที่ผิวของซิลิกา.....	34
รูปที่ 2.11 FT-IR spectra of (a) SBA-15 and (b) NH ₂ -SBA-15.....	35
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของ GO-SBA-15.....	37
รูปที่ 2.13 แสดงสเตอริยรอยด์ฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิด.....	38
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนงานวิจัย.....	45
รูปที่ 3.2 แสดงหมู่อะมิโนที่ติดบนซิลิกา	48
รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a) GO (b) SP (c) GO-SP (d) SiO ₂ -SP (e) NH ₂ -SiO ₂ -SP (f) GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	56
รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) GO (b) SP (c) GO-SP (d) NH ₂ -SiO ₂ -SP และ (e) GO- NH ₂ -SiO ₂ -SP	58
รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวดักจับ.....	60

รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (A1-2) GO (B1-3) SP (C1-3) GO-SP (D1-3) SiO ₂ -SP (E1-3) NH ₂ -SiO ₂ -SP และ (F1-3) GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP.....	61
รูปที่ 4.5	จลนพลศาสตร์การดูดซับ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (GO SP GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP).....	62
รูปที่ 4.6	จลนพลศาสตร์การดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นสูง.....	63
รูปที่ 4.7	จลนพลศาสตร์การแพร่ภายในของ MT บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ GO SP GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	65
รูปที่ 4.8	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (GO SP GO-SP SiO ₂ -SP NH ₂ -SiO ₂ -SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP) โดยเทียบจากความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการดูดซับต่อความเข้มข้นคงเหลือ	67
รูปที่ 4.9	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด (GO GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP) โดยเทียบปริมาณกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับกับน้ำหนักหนึ่งหน่วย.....	68
รูปที่ 4.10	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO ที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.15 g/L.....	68
รูปที่ 4.11	แบบจำลองการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด (A) GO (B) SP (C) GO-SP (D) SiO ₂ -SP (E) NH ₂ -SiO ₂ -SP และ (F) GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	70
รูปที่ 4.12	ประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ บนตัวกลางดูดซับ (GO SP GO-SP SiO ₂ -SP NH ₂ -SiO ₂ -SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP).....	71
รูปที่ 4.13	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์บนตัวกลางดูดซับ (GO SP GO-SP SiO ₂ -SP NH ₂ -SiO ₂ -SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP).....	72
รูปที่ 4.14	ผลของสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 2 mg-C/l ต่อการดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนตัวกลางดูดซับ (A) GO (B) SP (C) GO-SP (D) SiO ₂ -SP (E) NH ₂ -SiO ₂ -SP และ (F) GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	75
รูปที่ 4.15	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรบนตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	77

รูปที่ 4.16	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำเสีย สังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์บนตัวกลางดูดซับ PAC	78
รูปที่ 4.17	ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำเสีย สังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์บนตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	78
รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ MT เชิงเดี่ยวและแบบผสมในกรณีที่มี สารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตร บน ตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	79
รูปที่ 4.19	ประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับ (GO GO-SP NH ₂ -SiO ₂ -SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP) ด้วยแผ่นแม่เหล็ก (ใช้อัลตราโซนิก).....	80
รูปที่ 4.20	ประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับ (GO GO-SP NH ₂ -SiO ₂ -SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP) ด้วยแผ่นแม่เหล็ก (ไม่ใช้อัลตราโซนิก).....	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สเตียรอยด์ฮอร์โมนเป็นฮอร์โมนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา มีหน้าที่ในการรักษาสมดุลของร่างกาย ระบบสืบพันธุ์ ควบคุมเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ตอบสนองต่อสิ่งเร้า และยังสามารถเพิ่มการแสดงออกของเพศชาย จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมาจึงมีการนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อรักษาผู้ที่มีสภาวะขาดฮอร์โมน ใช้เป็นยาหรืออาหารเสริมในคนหรือสัตว์เพื่อเพิ่มการเมตาบอลิซึมในร่างกาย ควบคุมน้ำหนัก หรือเสริมสร้างกล้ามเนื้อ จากประโยชน์ดังกล่าวจึงทำให้มีการดัดแปลงมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเพิ่มน้ำหนัก กล้ามเนื้อ และลดการแสดงออกของเพศเมีย ซึ่งสารที่ใช้จะเป็นอนุพันธ์ของฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน ชื่อทางการค้าคือ 17 แอลฟา เมทิลเทสโทสเตอโรน (17-Alpha Methyltestosterone, MT) จากประโยชน์ของ MT ที่ช่วยในการแสดงออกของฮอร์โมนเพศชาย โดยลดปริมาณการสร้างรังไข่ ทำให้สัตว์น้ำเพศเมียมีระดับฮอร์โมนใกล้เคียงเพศผู้ ขนาดและน้ำหนักของสัตว์น้ำจึงเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ MT ที่ใช้สูงขึ้นนั้น ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของ MT ในสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม แม้ในปริมาณน้อยมากหรือระดับความเข้มข้นนาโนกรัมต่อลิตร ก็สามารถออกฤทธิ์ทางชีววิทยาได้ ถ้าในปริมาณที่สูงอาจก่อให้เกิดมะเร็ง (Legros และคณะ, 2000)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับและการกระจายตัวของ MT จะสูงขึ้นเมื่อขนาดของดินหรือตะกอนมีขนาดเล็กลง ขณะที่กลไกของการสัมผัสกับตะกอนนั้นยังไม่แน่ชัด แต่สามารถบอกเป็นนัยได้ว่าตะกอนที่มีการตกค้างของ MT จะเป็นตัวกระตุ้นกระบวนการออกฤทธิ์ของ androgenic ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และการตกค้างของ MT ระยะยาวในระบบทำให้เกิดการสะสมตามกล้ามเนื้อ และไขมัน นอกจากนี้จะทำให้การถอดรหัสยีน หรือพันธุกรรมเปลี่ยนแปลงไป จึงมีความจำเป็นต้องบำบัดน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการใช้ฮอร์โมนดัดแปลง MT ก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ เพื่อลดการสะสมและความเป็นพิษที่จะเกิดขึ้น

การกำจัด MT ด้วยระบบการบำบัดโดยทั่วไป (Li และคณะ, 2015) พบว่ากำจัดได้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ จึงมีการใช้ ริงส์ยูวี ซัลเฟตริตักชั้น ไนเตรตริตักชั้น และกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยปฏิกิริยาเพนตันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดให้สูงขึ้น แต่วิธีดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างของ MT เปลี่ยนไป รวมถึงยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดว่าการเปลี่ยนรูปของ MT จะมีความพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นแค่ไหน ดังนั้นจึงเลือกวิธีในการกำจัดออกจากระบบด้วยกระบวนการดูดซับซึ่งง่ายและไม่หลงเหลือสารตกค้าง ในงานวิจัยก่อนหน้านี้อาศัยแอคติเวทคาร์บอน (Activated carbon) เพราะมีราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย โดยอาศัยความเป็นรูพรุนแต่พบว่าค่าการดูดซับจำเพาะต่ำ และเกิดการหลุดออกของ MT จากรูพรุนได้ง่าย เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นเป็นแรงอ่อนๆ รวมถึงข้อจำกัดของพีเอช ส่งผลให้แอคติเวทคาร์บอนทำงานได้ดีที่พีเอชค่าใดค่านึงเท่านั้น นอกจากนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับมลสารเริ่มให้ความสนใจที่จะเลือกใช้ตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ เนื่องจากมีปริมาณพื้นผิวจำเพาะที่สูง (Pan และคณะ, 2014) โครงสร้างพื้นฐานเป็น

คาร์บอนที่เรียงตัวเป็นผลึกคล้ายรวงผึ้ง จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีสำหรับไฮโดรคาร์บอนแบบวง แต่สังเคราะห์ได้ยากและมีความไม่ชอบน้ำสูง (Hydrophobic) เลยดัดแปลงเป็น Graphene oxide (GO) ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน Hydroxyl Epoxide และ Carboxylic บนผิวของกราฟีน จึงแสดงสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) รวมไปถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบไม่จำเพาะเจาะจง (Delocalized π -electron) ทำให้จับได้ดีกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวง ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้มักพบได้ในยา และกลุ่มฮอร์โมน แต่ยังคงมีปัญหาในการกำจัดตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ออกจากระบบเนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กและสามารถแขวนลอยในน้ำ ดังนั้นการต่อติดกราฟีนออกไซด์ด้วยอนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (Magnetic) จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของตัวกลางดูดซับออกจากระบบได้

การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับโดยหุ้มอนุภาคแม่เหล็กแนติดกับกราฟีนออกไซด์ (Lin และคณะ, 2013) พบว่าประสิทธิภาพความเป็นแม่เหล็ก และค่าความดูดซับจำเพาะลดลง จากปัญหาข้างต้นจึงได้มีการศึกษาผลของการเพิ่มพื้นผิวกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับ เพื่อให้คงลักษณะเฉพาะของพื้นผิว และการเติมหมู่ฟังก์ชันอะมิโนลงไปเพื่อเพิ่มค่าการดูดซับจำเพาะ (Selectivity) ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น (Luo และคณะ, 2011) นอกจากนี้การต่อติดกราฟีนออกไซด์กับซิลิกาที่มีสมบัติแม่เหล็กน่าจะสามารเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของกราฟีนออกไซด์ และความชอบน้ำของตัวกลางดูดซับ รวมถึงสามารถปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ เนื่องจากซิลิกาประกอบไปด้วย ธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุออกซิเจน (O) มีการจัดเรียงตัวแบบ เตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลาง และล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม จึงทำให้มีคุณสมบัติทนต่อความร้อน ไม่ทำปฏิกิริยากับกรด พื้นผิวจำเพาะสูง และมีความสามารถดัดแปลงหมู่ฟังก์ชัน

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะทำการต่อติดกราฟีนออกไซด์ GO บนพื้นผิวของอนุภาคสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยซิลิกา รวมถึงผลของการต่อติดกับหมู่อะมิโนบนอนุภาคที่เคลือบซิลิกาต่อการต่อติดกับ GO (Pan และคณะ, 2014); (Zhang และคณะ, 2012); (Luo และคณะ, 2011) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ MT รวมถึงค่าการดูดซับจำเพาะมีค่ามากขึ้น อีกทั้งเมื่อผ่านการใช้งานแล้วตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ได้สามารถแยกออกน้ำเสียได้ง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัด 17 แอลฟาเมธิลเทสโทสเตอโรนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดบนอนุภาคแมกเนติกที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกา และไม่มีซิลิกา

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดแมกเนติกที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกาและไม่มีซิลิกา ในกรณีที่มี MT เชิงเดี่ยว และจากน้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติจากบ่อเลี้ยงปลา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ตัวกลางดูดซับที่ทำการศึกษาได้แก่ กราฟีนออกไซด์ (GO) อนุภาคแมกเนติก (SP) กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา (SiO_2 -SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา (NH_2 - SiO_2 -SP) และกราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดอนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและต่อติดหมู่อะมิโน (GO-NH_2 - SiO_2 -SP)

1.3.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับและมลสารที่ดูดซับ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM) พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิว (Bet surface area analyzer, BET) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) และ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดย Low angle powder X-ray diffraction (XRD)

1.3.4 ทำการทดลองการดูดซับแบบที่ละเท (Batch reactor) ที่ความเข้มข้นสูง (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระดับความเข้มข้นต่ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ MT ในกรณีเชิงเดี่ยว และในกรณีอยู่ร่วมกับสารอินทรีย์จากน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลา

1.3.6 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารอินทรีย์ในบ่อเลี้ยงปลาโดยใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของ Dissolved Organic Carbon (DOC) ที่ 0 2 5 และ 10 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร

1.3.8 ทดสอบการแยกตัวดูดซับจากแผ่นแม่เหล็กถาวร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อทราบถึงความสามารถในการดูดซับ 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยตัวกลางดูดซับกราไฟท์ออกไซด์ที่ติดต่อกับอนุภาคแมกเนติกที่ทำการเคลือบด้วยซิลิกาและไม่เคลือบซิลิกา

1.4.2 เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัด 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรน ออกจากแหล่งน้ำที่มีการเพาะเลี้ยงปลานิลจริงด้วยกระบวนการดูดซับ และแยกตัวกลางดูดซับออกจากระบบโดยใช้สมบัติความเป็นแม่เหล็กของตัวกลางดูดซับ

1.4.3 เพื่อนำข้อมูลทางจลพลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับมาศึกษากลไกในการดูดซับเพื่อพัฒนาการนำไปใช้จริงกับระบบปฏิบัติการขั้นพื้นฐาน เนื่องจากงานวิจัยนี้ยังมีผู้ศึกษาน้อยจึงยังมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะรู้กลไกที่เกิดขึ้นได้อย่างแน่ชัด



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สเตียรอยด์ฮอร์โมน (Stocco, 2011)

เป็นฮอร์โมนที่สร้างมาจาก Hypothalamic-Pituitary-Adrenal/Gonadal Axis ผ่านการทำงานของ Trophic hormone Releasing hormone และ Trophic hormone (Stocco, 2011) ฮอร์โมนสเตียรอยด์มีหน้าที่ในการรักษาสมดุลของร่างกาย และระบบสืบพันธุ์ ใช้สำหรับการควบคุมเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต การตอบสนองต่อแรงกดดัน และการกระตุ้นระบบต่าง ๆ ในเพศหญิง โดยสามารถระบุได้ว่าฮอร์โมนสเตียรอยด์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างรังไข่ และรก คือ เอสโตรเจน (Estrogen) และ โปรเจสเตอโรน (Progesterone) ซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนาของฟอลลิเคิล การตกไข่ การพัฒนาลักษณะที่สองของเพศหญิง (Secondary sex characteristic) และส่งเสริมการตั้งครรภ์ ส่วนฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (Testosterone) เป็นฮอร์โมนเพศชายที่ส่งเสริมการสร้าง แอนโดรเจน (Androgen) และ ไดไฮโดรเทสโทสเตอโรน (Dihydrotestosterone) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างอสุจิ และการพัฒนาลักษณะที่สองของเพศชาย จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมานั้นจึงมีการนำสเตียรอยด์ฮอร์โมนมาดัดแปลงเพื่อการรักษาทางการแพทย์ เสริมการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงเพศของสัตว์น้ำ ซึ่งในปัจจุบันฮอร์โมนสังเคราะห์ (17-alpha-methyl testosterone) หรือที่เรียกว่า MT ได้รับความนิยมในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเนื่องจากสามารถเพิ่มน้ำหนักของสัตว์น้ำได้ โดยการเปลี่ยนแปลงที่แสดงออกทางเพศเมีย ให้เป็นเพศผู้ เนื่องจากมีการใช้ MT เป็นจำนวนมากทำให้มีบางส่วนไหลไปสู่แหล่งน้ำที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดการปนเปื้อนซึ่งพบว่าสารเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อปลาและสัตว์น้ำแม่ที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ (~1 ng/L) (Gao และคณะ, 2015) โดยจะลดอัตราการเกิด และการแสดงออกของฮอร์โมนเพศเมีย เนื่องจาก MT จะทำให้สัตว์น้ำแสดงลักษณะความเป็นเพศผู้และเป็นหมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณแหล่งน้ำผิวดินมีโอกาสปนเปื้อนสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ได้จากน้ำเสียตามบ้านเรือน

2.1.1 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (17 α -Methyltestosterone, MT)

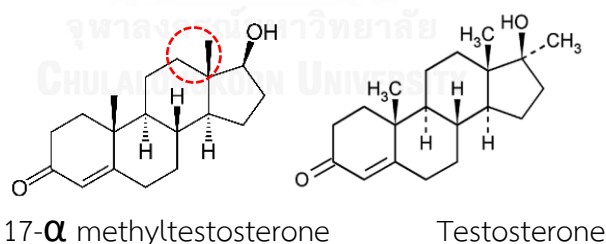
MT เป็นสารอะนาบอลิกสเตียรอยด์ สารที่สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตทางเพศ และความแข็งแรงของกล้ามเนื้อได้ โดยการจับกับ Androgen receptor โดย Steroid แต่ละชนิดจะแตกต่างกันตรงหมู่ฟังก์ชันที่ต่อกับวงเบนซีน ลักษณะโครงสร้างหลักประกอบด้วยคาร์บอนต่อกันเป็นวง 4 วง ซึ่งจะมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้นเอง โดยสเตียรอยด์แต่ละชนิดจะต่างกันไปตามหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนวงเบนซีน เช่น เทสโทสเตอโรน (Testosterone) และ แอนโดรสทีน ไดโอน (Androstenedione) ตัวอย่างของสเตียรอยด์สังเคราะห์ เช่น 17 เบตาเอสตาไดออล (17 β -estradiol) 17 แอลฟาเมธิลเทสโทสเตอโรน (17- α methyltestosterone) และ 17 เบต้าเทรนโบลอน (17-Trenbolone) ซึ่งเมธิลเทสโทสเตอโรน เป็นฮอร์โมนที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันการดัดแปลงเพศของสัตว์น้ำ

MT เป็นแอนโดรเจนสังเคราะห์ที่ออกฤทธิ์โดยการจับกับ Androgen receptor รู้จักกันในชื่อของฮอร์โมนแทนที่ ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับผู้ที่มีขาดฮอร์โมนเพศชาย โดยจะมีผลต่อการสร้าง เอสโตรเจน โดยการควบคุมการแสดงออกของฮอร์โมนเพศชายที่ต่อมหมวกไต (Aromatase) หรือยับยั้งการแสดงออกของฮอร์โมนเพศชายที่ต่อมหมวกไต (Mor และคณะ, 2001) และขัดขวางระบบของต่อมไร้ท่อของสิ่งมีชีวิตที่มีกระดูกสันหลัง

โดยส่วนใหญ่ MT มักจะมีการนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อควบคุมลักษณะการแสดงออกของเพศตามที่ต้องการ โดยการเหนี่ยวนำการแสดงของเพศผู้เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้น MT สามารถตรวจพบได้ในแหล่งน้ำเนื่องจากถูกนำมาใช้เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ยาสำหรับคนหรือสัตว์ และยาที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังและกล้ามเนื้อ ปริมาณ MT ที่ตรวจพบจากโรงงานสารเคมีเท่ากับ 1.33 ng/L (Blankvoort และคณะ, 2005) ส่วนแหล่งน้ำโดยทั่วไปพบ 4.1-7.0 ng/L (Hu และคณะ, 2011) น้ำเสียขาออกพบ 250 ng/L แม่น้ำพบ 22 ng/L โดย MT มีความสามารถที่จะออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้แม้อยู่ในช่วงระดับความเข้มข้น 1 ถึง 100 ng/L

2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (MT)

MT เป็นอนุพันธ์ของเทสโทสเตอโรนโดย มีลักษณะโครงสร้างทางโมเลกุลต่างจากเทสโทสเตอโรนตรงหมู่เมธิลบนคาร์บอนตำแหน่งแอลฟา 17 (C-17- α position) ชื่อทางเคมีของ MT คือ 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (Android® หรือ Virilon®) โดยโครงสร้างหลักของ MT ประกอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมสามวง และวงห้าเหลี่ยม 1 วง ดังรูปที่ 2.1 โดย 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน จะมีแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 17 จึงทำให้มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและคุณสมบัติทางเคมีที่ต่างจาก เทสโทสเตอโรน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ 17- α methyltestosterone และ Testosterone

ตารางที่ 2.1 แสดงแนวโน้มของ MT ที่ถูกดูดซับละลายในน้ำและในดินหรือตะกอนอินทรีย์ (ฉมนรี สุขเกษม, 2556)

Hormone	Symbol	Structure	Mw	Log K _{ow}	pK _a	Half-life (hr)
Estrone	E1	C ₁₈ H ₂₂ O ₂	270.4	3.13	10.3-10.8	19
Estriol	E3	C ₁₈ H ₂₃ O ₃	288.4	2.45	10.4	NA
Ethinyl estradiol	EE2	C ₂₀ H ₂₄ O ₂	296.4	3.67	NA	36
testosterone	-	C ₁₉ H ₂₂ O ₂	288.4	3.32	NA	2-4
17 α -estradiol	17 α -E2	C ₁₈ H ₂₄ O ₂	272.4	3.94	NA	NA
Methyltestosterone	MT	C ₂₀ H ₃₀ O ₂	302.45	3.36	NA	NA

*Mw คือน้ำหนักโมเลกุล, log K_{ow} คือค่าการละลายในแอลกอฮอล์ V_p คือความดันไอ และ K_H คือค่าคงที่ของแก๊ส จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า MT มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนอินทรีย์มากกว่าการละลายในน้ำ

2.1.3 พิษวิทยาของ 17 แอลฟาเมธิลเทสโทสเตอโรน

17 แอลฟาเมธิลเทสโทสเตอโรนจะมีผลต่อจีโนมบนต่อมเพศ และสเตียรอยด์ฮอร์โมนในปลาน้ำจืด ซึ่งพบว่าสัตว์น้ำที่สัมผัสกับ MT จะทำให้ปริมาณการผลิตของรังไข่ลดลง และทำให้แสดงลักษณะความเป็นเพศผู้สูงขึ้น เนื่องจาก MT มีผลต่อการทำงานของยีนที่ไวยวะสืบพันธุ์ และการขนส่งอิเล็กตรอนของ Complex IV, เซลล์เยื่อ, โครโมโซมที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต การสลายตัวของโปรตีน และการเมทาบอลิซึมของกลูตาเมต (Gao และคณะ, 2015) ผลการยับยั้งการสร้างเซลล์สืบพันธุ์เนื่องจากการลดลงของยีนที่ใช้ในการถอดรหัส ep300, skp1, pim1 และ ctstl ในถุงอวัยวะ ทำให้มีผลต่อการแบ่งตัว และการเปลี่ยนรูปเพื่อทำหน้าที่เฉพาะของเซลล์สืบพันธุ์โดยจะขัดขวางการแบ่งตัวในช่วง G1 และ S

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกลุ่มตัวอย่างที่มีการใช้ MT และกลุ่มควบคุม (Gao และคณะ, 2015)

		E2 (ng/g)	T (ng/g)	11-KT (ng/g)
Female	Control	1.16±0.04	44.70±1.44	0.88±0.02
	MT	1.36±0.03	54.80±2.02	1.06±0.03
	P-value	0.009	0.004	0.000
Male	Control	0.85±0.03	74.99±2.31	1.18±0.04
	MT	0.69±0.02	60.28±0.86	0.92±0.01
	P-value	0.001	0.000	

พิษเฉียบพลันโดยการรับเข้าทางปากของหนู มีค่า LD50 เท่ากับ 2.5 mg/kg สาร MT เข้าสู่ร่างกายได้หลายทางคือ ทางหายใจ อาจเกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทางการกิน ทางผิวหนัง และทางตา เมื่อเทียบจากตารางที่แสดงอัตราการเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง (ตาราง 2.3) พบว่า MT เป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่ม 1B ซึ่งอาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ ซึ่งจัดโดย IARC, OSHA, ACGIH, NTP หรือ EPA จากการทดลองในระดับปฏิบัติการพบว่าหนูที่ได้รับ MT มากเกินไปจะมีผลต่อตัวอ่อนทำให้ตัวอ่อนเกิดการพิการแต่กำเนิดได้

ตารางที่ 2.3 การจำแนกกลุ่มสารที่อาจเป็นสารก่อมะเร็ง

(ฉนวนรี สุขเกษม, 2556)

กลุ่ม A	ก่อมะเร็งในมนุษย์
กลุ่ม B	เป็นไปได้ที่จะก่อมะเร็งในมนุษย์
กลุ่ม C	อาจจะก่อมะเร็งในมนุษย์
กลุ่ม D	ยังจำแนกไม่ได้ว่าเป็นสารก่อมะเร็ง
กลุ่ม E	ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์

ความเข้มข้นของ MT ที่ตรวจพบจากแหล่งต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งจะแสดงถึงปริมาณความเข้มข้นตามแหล่งกำเนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าช่วงความเข้มข้นที่พบอยู่ในระดับที่ต่ำมาก และในแต่ละแหล่งน้ำมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก จึงควรที่จะศึกษาผลของสารอินทรีย์ที่มีต่อ MT

ตารางที่ 2.4 ปริมาณความเข้มข้นของ MT ในแหล่งน้ำต่างๆ

(ฉนวนรี สุขเกษม, 2556)

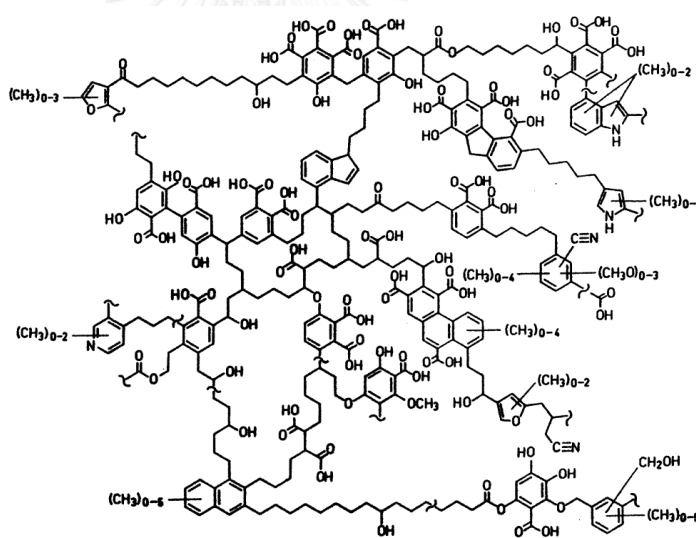
แหล่งกำเนิด	ปริมาณความเข้มข้น (ng/L)
โรงงานสารเคมี	1.33
แหล่งน้ำตามธรรมชาติ	4.10-7.00
น้ำเสียก่อนการบำบัด	250

2.2 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) (รูป 2.2) พบได้ทั่วไปตามน้ำผิวดิน ทะเลสาบ บ่อ และคลอง ซึ่ง NOM เกิดจากการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ ซึ่ง NOM สามารถย้ายจากแหล่งกำเนิดหนึ่งไปยังอีกแหล่งกำเนิดหนึ่งได้ โดยจำนวน NOM ที่เกิดขึ้นจะยากต่อการควบคุม แม้ว่าจะการบำบัดเบื้องต้นแล้วก็ตามยังพบการตกค้างของ NOM ส่วนสาเหตุการเกิด NOM อาจมาจากการผุพังหรือผุกร่อนของดิน มนุษย์ สัตว์ และอุตสาหกรรม เราสามารถสังเกตปริมาณของ NOM ที่เกิดขึ้นได้จากจำนวนของสาหร่าย เนื่องจากโครงสร้างสาหร่ายที่มี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็น

สารประกอบหลักที่จำเป็นต่อการเพิ่มขึ้นของ NOM (Zumstein และคณะ, 1989) (Croue และคณะ, 2000)

NOM มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถแบ่งได้เป็น สารอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำ และไม่สามารถละลายน้ำ ประกอบด้วยพอลิอะโรมาติกคาร์บอน เป็นวงอะโรมาติกหลายวงต่อกัน และมีฟีนอลิกเป็นหมู่ฟังก์ชันซึ่งคอนจูเกตกับพันธะคู่ในโมเลกุล โดยกลุ่มอะโรมาติกจะถูกแทนที่ด้วยหมู่แทนที่ที่ต่างกันรวมไปถึงการแทนที่เชิงเดี่ยว และการแทนที่แบบผสมทำให้มีสารหลายกลุ่มเข้าไปแทนที่บนสารอินทรีย์ธรรมชาติ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สารอินทรีย์ของแหล่งน้ำแต่ละแหล่งมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นค่าค่าการกระจายตัว ความสามารถในการละลายน้ำ หรือประจุที่จะเกิดขึ้น ณ ช่วง pH ต่างๆ (Traina และคณะ, 1990) ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่ม TOC ได้ ออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือกลุ่มสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้กับละลายน้ำไม่ได้ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (dissolved organic carbon, DOC) เพื่อความสะดวกในการกรองและป้องกันการอุดตันในเครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC) ซึ่งกระดาษกรองที่นำมาใช้คือ nylon filter 0.22 μm โดยน้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยมาจากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 Natural organic matter

(Murimboh, 2015)

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้ MT เห็นได้ชัดว่าสามารถแพร่ไปได้ในวงกว้าง จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดออก ซึ่งการบำบัดโดยทั่วไปด้วยการกรอง หรือตกตะกอนไม่สามารถที่จะจัดการได้ จึงได้มีงานวิจัยบางส่วนกำจัดโดยใช้กระบวนการออกซิเดชัน หรือปฏิกิริยาเฟนตัน เพื่อสลายโครงสร้าง แต่กลไกการเปลี่ยนรูปของ MT ยังมีการศึกษาน้อยจึงไม่แน่ชัดว่าเมื่อเปลี่ยนรูปแล้วจะเกิดความเป็นพิษในระดับไหน ดังนั้นการกำจัด MT ออกโดยกระบวนการดูดซับจึงมีความเหมาะสมที่สุด โดยอาศัยหลักการดังนี้

2.3 การดูดซับ

2.3.1 หลักการของการดูดซับ

การดูดซับเป็นการแยกลำแสงที่ต้องการดูดซับออกจากระบบที่สนใจโดยการเคลื่อนสารจากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็งหรือที่ตัวดูดซับ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารที่สนใจลดลง โดยจะไม่คำนึงถึงการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโพลีเมอร์ไรซ์เซชัน ซึ่งโดยรวมแล้วสามารถแบ่งประเภทของแรงที่เกิดขึ้นได้ 2 ชนิด

2.3.1.1 แรงทางกายภาพ

จากสภาพการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นอิสระของอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้วทำให้ความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ทำให้ค่าไดโพลโมเมนต์ที่แสดงออกมาในแต่ละตำแหน่งบนโมเลกุลของ MT มีความแตกต่างกันทำให้เกิดสภาพความเป็นขั้ว จึงสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้แต่เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการดูดซับต่ำ อนุภาคของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจึงเกาะกันอย่างอ่อนๆทำให้ง่ายต่อการคายซับ (Desorption) ซึ่งเป็นข้อดีคือ สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)

แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบอ่อนๆ เนื่องจากโมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพระหว่างอะตอมที่อยู่เป็นอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว โดยอิเล็กตรอนภายในอะตอมหรือ ทำให้ความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนในโมเลกุลจึงเสียความเป็นสมมาตรโมเลกุลจึงเกิดสภาพความเป็นขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับ ซึ่งพลังงานในการดูดซับมีค่าต่ำ ดังนั้นการคายซับ (Desorption) ทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวกลางดูดซับได้ง่าย ซึ่งแรงแวนเดอร์วาลส์ประกอบด้วยแรงต่อไปนี้

ข. แรงขั้วคู่-แรงขั้วคู่ (Dipole-dipole interaction)

แรงขั้วคู่-แรงขั้วคู่ เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีสภาพขั้วกับพื้นที่ผิวตัวกลางดูดซับชนิดที่มีขั้วแบบถาวร (Permanent dipole) ทำให้โมเลกุลนั้นแสดงสภาพขั้วที่ตรงข้ามกับตัวกลางดูดซับชนิดที่มีสภาพขั้วแบบถาวรเช่นในกรณีที่มีสภาพขั้วเป็นบวก (δ^+) จะหันเข้าหาส่วนที่มีสภาพเป็นลบ (δ^-) จึงทำให้มีแรงดึงดูดเกิดขึ้น แรงชนิดนี้เป็นแรงไฟฟ้าสถิตย์สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของคูลอมบ์ ขนาดของแรงจะขึ้นกับค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment, μ) กล่าวคือเมื่อโมเลกุลมีค่าโมเมนต์ขั้วคู่สูงขึ้น ก็จะทำให้ขนาดแรงขั้วคู่-แรงขั้วคู่สูงขึ้นไปด้วย โดยนิยามว่าเป็นผลคูณของประจุ (Q) และระยะห่างระหว่างประจุ (r) ดังสมการ $\mu = Q \times r$ ซึ่งค่า μ จะบอกถึงความมีขั้วของพันธะในเชิงปริมาณ

3.3.1.2 แรงทางเคมี (Chemical force)

เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างไอออนของมลสารกับตัวกลางดูดซับ แล้วเกิดใหม่เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) เช่นการดูดซับของหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของตัวดูดซับกับหมู่โลหะทรานซิชัน ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้น มาจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรืออาจกล่าวโดยนัยว่าเป็นการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ

ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่กับผิวของของแข็ง ด้วยแรงดึงดูดของโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของเหลว นั้น โดย สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate)

2.3.2 ประเภทของการดูดซับ

สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทดังนี้

1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นแรงดึงดูดอ่อนๆที่เกิดขึ้นจากความต่างของพลังงาน หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attractive force) ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอวาลส์ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เกาะที่โมเลกุลของตัวดูดซับ โดยลักษณะของโมเลกุลที่เกาะกันนั้นจะซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพ พบว่าความหนาของชั้นโมเลกุลที่มาเกาะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับได้ (reversible) การดูดซับประเภทนี้จึงขึ้นอยู่กับความแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดมีค่าน้อยจะสามารถเกิดการคายซับได้ (Desorption)

2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption)

จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ แล้วเกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ทำให้ค่าพลังงานของการดูดซับมีความใกล้เคียงกับค่าของพลังงานในการเกิดพันธะเคมี โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยกระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวหรือที่เรียกว่าการดูดซับแบบชั้นเดียว และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ความแข็งแรงของการดึงดูด วัดได้จากผลต่างของค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางเคมีจะให้ค่าพลังงานสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ

ตารางที่ 2.5 แสดงความแตกต่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
- ไม่ได้เกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน	- จะเลือกเฉพาะบริเวณที่เกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
- บริเวณที่เกิดปฏิกิริยามีได้ไม่จำกัด โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเข้าไปเกาะที่ผิวส่วนใดก็ได้	- ค่าความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
- ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าต่ำมีค่าเท่ากับค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลว	- ส่วนการดูดซับจะเกิดการดูดซับได้อย่างสมบูรณ์ในขั้นแรก
- โมเลกุลที่มาเกาะจะเกิดการเรียงตัวแบบหลายชั้นบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ บางครั้งการดูดซับ จะเกิดขึ้นที่ผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้	

ส่วนการดูดซับทางเคมีก็สามารถเกิดขึ้นทันทีได้เช่นกัน โดยอาศัยพลังงานกระตุ้นเนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับชนิดของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับแบบกายภาพจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว ถ้าหากเป็นการดูดซับทางเคมี ค่าความร้อนจะสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับการดูดซับแบบกายภาพ โดยค่าความร้อนที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไม่มากนัก โดยทั่วไปแล้วการดูดซับที่เกิดขึ้นมักมีแนวโน้มไปทางการดูดซับเชิงกายภาพ

2.3.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion)

เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวละลายเข้าไปถึงสารดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลว เข้าถึงผิวหน้าของสารดูดซับ โดยขั้นตอนนี้จะนำมวลสารที่ถูกดูดซับเข้าไปยังพื้นผิวของสารดูดซับ หรือที่บริเวณรูพรุน ดังสมการ 2.1

$$\frac{dq}{dt} = k_f S(C - C^*) \quad (2.1)$$

เมื่อ q = ปริมาณของสารดูดซับของพื้นผิวของสารดูดซับ ต่อน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมมวลสารต่อกรัมตัวกลางดูดซับ)

- T = ระยะเวลา (วินาที)
 k_f = mass transfer coefficient (external) (เมตรต่อวินาที)
 S = พื้นที่ผิวของสารดูดซับ (ตารางเมตรต่อกรัม)
 c = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 c^* = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวหน้าของของแข็ง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

2. การแพร่ภายใน (Internal diffusion)

เป็นกลไกที่ถ่ายโอนมวลสารจากระบบผ่านชั้นฟิล์มแล้วเข้าสู่รูพรุนโดยแสดงได้ดัง

สมการ 2.2

$$\frac{dq}{dt} = K_D a_v (q - q^*) \quad (2.2)$$

q^* = ปริมาณของสารดูดซับที่สมดุลกับ C^* (มิลลิกรัมมวลสารต่อกรัมตัวกลางดูดซับ)

a_v = พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ณ บริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction)

เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวละลายยึดติดกับตัวกลางดูดซับ โดยปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้านทานในระบบไม่ถูกนำมาคำนวณ

2.3.4 ขั้นตอนการดูดซับ

แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

ก. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด

ข. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวต่างๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) หรือเรียกได้ว่าเป็นขั้นจำกัดอัตราของการดูดซับในขั้นตอนที่หนึ่ง

ค. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดการแพร่ของสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ ขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน

ง. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของมวลสารมายังตัวดูดซับ

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม และการขนส่งภายในอนุภาค จะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับแต่ถ้าให้ระบบมีสภาพปั่นป่วน จะถือว่าขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคเป็นขั้นตอนที่จะควบคุมอัตราการดูดซับ

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ สำหรับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแปรผันตามความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารนั้นไม่มีรูพรุน จึงจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะแปรผันตามเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

2. ลักษณะของการดูดซับ

สิ่งสำคัญในการดูดซับของตัวดูดซับอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลงเนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของ ตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับและ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

3. ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งของโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนเหล่านี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) การแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำจะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนมากทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็วขึ้น ดังนั้นการแพร่เข้าสู่รูพรุนจะถือว่าเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4. เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในระบบน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจะได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด ทั้งนี้ยังขึ้นกับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมจะได้อาจได้จากการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้จริง

5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชถือว่าเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวด้วยพันธะที่แข็งแรง ทำให้ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นค่าพีเอชจึงมีผลต่อการดูดซับ

2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetic)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงอัตราเร็วในการดูดซับ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับต่อเวลา โดยปกติในระยะแรกอัตราการเร็วในการดูดซับจะมีค่าสูง และจะลดลงไปตามเวลา จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและ อันดับสองเสมือน

1 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic)

แสดงให้เห็นดังสมการ 2.3

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2.3)$$

และสามารถเขียนสมการเชิงเส้นได้ดังสมการ 2.4

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.4)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับในสภาวะสมดุล (ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (ไมโครกรัมต่อกรัม)

k_1 = ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ต่อชั่วโมง)

2 จลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second order kinetic)

ดังสมการ 2.5

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (2.5)$$

แสดงสมการเชิงเส้น (2.6)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับในสภาวะสมดุล (ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (ไมโครกรัมต่อกรัม)

t = เวลา (ชั่วโมง)

k_2 = ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ต่อชั่วโมง)

2.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับคือจุดที่อัตราการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายของสารที่ถูกดูดซับออกสู่สารละลายจนเข้าสู่สภาวะที่คงที่หรือความเข้มข้นของมลสารในสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงเรียกตำแหน่งนี้ว่า สมดุลของการดูดซับ ณ จุดสมดุลนี้จะเป็นจุดสมดุลของทั้งระบบ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับหรือในของเหลวได้ ซึ่งปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะแปรผันตามความเข้มข้นของมลสารที่ถูกดูดซับ โดยกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับ (ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลาย) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุล เรียกว่าไอโซเทอมของการดูดซับ โดยประเภทของไอโซเทอมที่อธิบายทฤษฎีการดูดซับดังต่อไปนี้

2.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

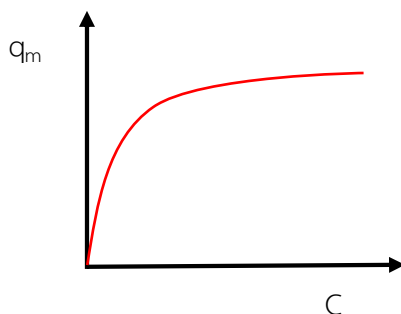
แสดงได้ดังสมการ 2.7

$$q = \frac{q_m k C}{1 + k C} \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- q = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - C = ความเข้มข้นคงเหลือของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - k = ค่าคงที่ของการดูดซับ

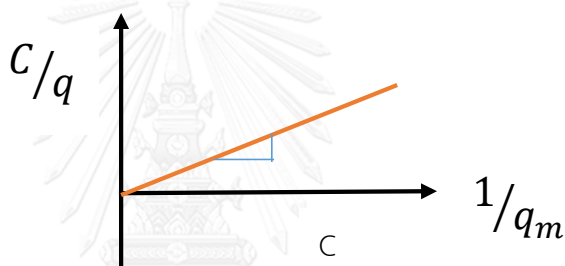
สมมติฐานของการดูดซับแบบแลงเมียร์มีดังต่อไปนี้

- ก. พลังงานของการดูดซับบนตัวดูดซับมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง
- ข. ตำแหน่งโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของมลสารที่ถูกดูดซับ
- ค. ตำแหน่งบนตัวดูดซับต่อหนึ่งบริเวณจะจับกับโมเลกุลของมลสารที่ถูกดูดซับหนึ่งหน่วย
- ง. จำนวนพื้นที่บริเวณที่เกิดการดูดซับมีปริมาณแน่นอนซึ่งกำหนดได้จากลักษณะของพื้นที่ผิว



เมื่อกำหนดให้ q เข้าสู่ q_m และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ ดังสมการ 2.8

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{kq_m} + \frac{C}{q_m} \quad (2.8)$$



เมื่อหารสมการข้างต้นด้วย C จะได้ดังสมการ 2.9

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Ckq_m} + \frac{1}{q_m} \quad (2.9)$$

2.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

แสดงดังสมการ 2.10

$$q = kC_e^{1/n} \quad (2.10)$$

เมื่อ k และ n = ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช สามารถบอกถึงประสิทธิภาพการดูดซับได้ด้วยค่า $1/n$ โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำเมื่อ $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 ในทางกลับกัน ประสิทธิภาพการดูดซับจะสูงเมื่อค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 และถ้าหากกราฟมีความชันมากๆ แสดงว่าสารนั้นสามารถดูดซับได้ดี

2.5.3 ไอโซเทอมการดูดซับของโกเบลคอร์ริแกน (Koblecorrigan's isotherm)

เป็นแบบจำลองที่ผสมระหว่างแลงเมียร์และฟรุนดลิช ซึ่งแสดงดังสมการ 2.11

$$q_e = q_0 \left(\frac{K_{Kc} C_e}{1 + (K_{Kc} C_e)} \right) \quad (2.11)$$

- เมื่อ
- q_e = จำนวนมลสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - q_0 = จำนวนสูงสุดของมลสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - K_{Kc} = ค่าคงที่การดูดซับของโกเบล และคอร์ริแกน
 - n = ดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองที่มีผลต่อการดูดซับจำนวนมลสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล
 - C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อลิตร)

2.6 การแยกด้วยแม่เหล็กแรงสูง (HGMS)

2.6.1 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic strength field)

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ขึ้นกับจำนวนของฟลักซ์ของแม่เหล็ก และความสามารถในแผ่สนามแม่เหล็กของสารที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (ณัฐพร เอี่ยมสะอาด, 2557)

2.6.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก คือปริมาณแรงแม่เหล็กภายในที่วัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กเป็นตัวสร้างขึ้นมาเอง เช่นแม่เหล็กถาวร โดยค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก จะขึ้นกับค่าคงตัวของสารที่จะทำให้เป็นแม่เหล็ก (μ_m) ซึ่งเป็นค่าคงตัวของคุณสมบัติของตัวกลางแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังจะแสดงให้เห็นในสมการ 2.11

$$B = \mu_m H \quad (2.11)$$

- เมื่อ
- H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร)
 - B คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)
 - μ_m คือ ค่าคงตัวในการเปลี่ยนสภาพของวัตถุให้เป็นแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร)

2.6.3 แรงแม่เหล็ก (Magnetic force)

แรงแม่เหล็กเป็นแรงของการทำให้ประจุเคลื่อนที่ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ ลอเรนซ์ (LORENTZ LAW) ตามสมการ (2.12)

$$F_m = (v \times B) \quad (2.12)$$

- เมื่อ F_m คือ แรงในการเคลื่อนย้ายประจุ (นิวตัน)
 Q คือ ประจุไฟฟ้าบนอนุภาค (คูลอมบ์)
 V คือ ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ (เมตรต่อวินาที)
 B คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ (เทสลา)

แรงแม่เหล็กของอนุภาคเมื่อนำไปใช้ในสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2.13)

$$F_m = \mu_0 V_p M_p \times \nabla H \quad (2.13)$$

- เมื่อ F_m คือ แรงในการเคลื่อนย้ายประจุ (นิวตัน)
 μ_0 คือ ค่าคงตัวของกาที่จะทำให้เกิดแม่เหล็กได้ของวัตถุในสภาวะสุญญากาศ (แอมแปร์ต่อเมตร)
 V_p คือ ปริมาตรของอนุภาค (ลูกบาศก์เมตร)
 M_p คือ PARTICLE MAGNETIZATION (แอมแปร์ต่อเมตร)
 ∇H คือ เกรเดียนท์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่อนุภาคอยู่

นอกจากนี้ยังมีแรงอีก 3 แรงที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกด้วยแม่เหล็ก ดังต่อไปนี้

2.6.4 แรงดึงดูดของโลก (Gravity force)

แรงดึงดูดของโลกเป็นแรงที่ดึงให้วัตถุตกลงไปด้วยตัวเองในของเหลวด้วยน้ำหนักของตัววัตถุเอง สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.14)

$$F_g = (P_p - P_g) V_p g \quad (2.14)$$

- เมื่อ F_g คือ แรงดึงดูดของโลก (นิวตัน)
 P_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 P_g คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 V_p คือ ความเร่งของแรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาที²)

2.6.5 แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal force)

แรงสู่ศูนย์กลางเป็นแรงที่มีการเคลื่อนที่ซึ่งจะเกิดก็ต่อเมื่ออนุภาคมีความปั่นป่วนสามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.15

$$F_c = (P_p - P_g)\omega V_{pr} \quad (2.15)$$

เมื่อ F_c คือ แรงสู่ศูนย์กลาง (นิวตัน)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
 r คือ รัศมีของอนุภาค (เมตร)

2.7 เทคนิคการสกัดเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (Solid phase extraction, SPE)

เป็นเทคนิคการแยกสารปนเปื้อนออกโดยให้สารที่ต้องการติดอยู่กับตัวดูดซับใน cartridge จากนั้นเติมตัวทำละลายเพื่อดึงเอาสารที่สนใจที่เกาะกับตัวดูดซับออก เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยขั้นตอนการใช้ SPE มีขั้นตอนง่ายๆ 4 ขั้นตอนดังนี้

1 Condition

เป็นการเตรียม ตัวดูดซับที่อยู่ในหลอด (Cartridge) ให้อยู่ในสภาวะที่พร้อมใช้งานโดยการใส่ตัวทำละลายที่เหมาะสมลงใน SPE (เพื่อให้ตัวดูดซับใน SPE อิ่มไปด้วยตัวทำละลาย) จากนั้นทำการปล่อยตัวทำละลายทิ้งโดยให้ตัวทำละลายอยู่เหนือจากตัวดูดซับ ประมาณ 0.5 cm

2 Load

เป็นการใส่สารตัวอย่างลงไปเพื่อให้จับกับตัวดูดซับ โดยในขั้นตอนนี้จะต้องควบคุมแรงดันสุญญากาศให้ต่ำเพื่อป้องกันการหลุดออกของมวลสารที่สนใจจากตัวดูดซับ จากนั้นทำการปล่อยสารตัวอย่างทิ้งโดยให้สารตัวอย่างอยู่เหนือจากตัวดูดซับ ประมาณ 0.5 cm

3 Rinse

เป็นขั้นตอนที่นำสารที่จับกับตัวดูดซับได้น้อยหรือจับอยู่บริเวณผิวของตัวดูดซับออกซึ่งอาจจะข้ามขั้นตอนนี้ไปก็ได้โดยแบ่งเป็น 2 กรณี

- ก. จะใช้ขั้นตอนนี้ก็ต่อเมื่อ SPE-sorbent มีความจำเพาะกับสารที่เราสนใจวิเคราะห์ แต่ SPE-sorbent ไม่เหมาะกับสารรบกวน เราก็จะล้าง
- ข. จะข้ามขั้นตอนนี้เมื่อ SPE-sorbent เหมาะกับสารรบกวน แต่ไม่เหมาะกับสารที่จะวิเคราะห์

4 Elution

เป็นการดึงสารที่เราสนใจที่เกาะกับตัวดูดซับออก เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมในการชะสารที่สนใจวิเคราะห์ออกมา

ตารางที่ 2.6 แสดงข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการแยกสารบนเป็อนออก

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ลดปริมาณตัวทำละลายที่ต้องใช้	1. ยังต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์
2. ประหยัดเวลา	2. มีหลายขั้นตอนในการทำ
3. ใช้กับระบบการเตรียมตัวอย่างแบบอัตโนมัติได้	3. ความชำนาญของผู้วิเคราะห์
4. เลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้หลายชนิด	

สำหรับการนำไปใช้ วิธีนี้เหมาะต่อการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยยาก (Non-volatile-organic compound) หรือกึ่งระเหย (Semi-volatile organic compound) โดยนำมาเพิ่มความเข้มข้น (Preconcentration) จนถึงระดับที่สามารถตรวจวัดได้

2.8 ตัวกลางดูดซับ

2.8.1 อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็กเป็นหนึ่งในสมบัติพิเศษที่เกิดขึ้นจากวัสดุระดับนาโน ซึ่งสมบัติทางแม่เหล็กนี้จะขึ้นกับโครงสร้างและลักษณะการจับตัวของอะตอมหรือธาตุที่รวมตัวกันขึ้นเป็นวัสดุ โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มต่างๆ ตามคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้ดังนี้

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

ชนิดและคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก	สภาพความเป็นแม่เหล็กในสนามไฟฟ้า	สภาพความเป็นแม่เหล็กนอกสนามไฟฟ้า	การจัดเรียงอิเล็กตรอน
- ไดอามกเนติก (diamagnetic)	- แสดงค่าความเป็นแม่เหล็กได้เล็กน้อยในเชิงลบ	- ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็ก	- เกิดในออบิทอลของโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเข้าคู่ออบิทอล
- พาราแมกเนติก (paramagnetic)	- แสดงค่าความเป็นแม่เหล็กได้เล็กน้อยในเชิงบวก	- ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็ก	- เกิดได้ดีถ้าไม่มีออบิทอลของโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเข้าคู่
- เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic)	- มีความเป็นบวกทางสนามแม่เหล็กอย่างแรง	- สามารถคงสภาพความเป็นแม่เหล็ก	

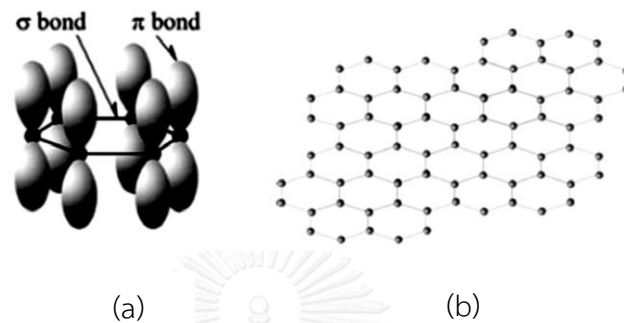
สำหรับวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ แอนติเฟอร์โรแมกเนติก และเฟอร์ริแมกเนติก วัสดุประเภทแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เช่น Mn Cr MnO NiO CoO และ $MnCl_2$ จะไม่แสดงสภาพความเป็นแม่เหล็ก เนื่องจากข้อของอิเล็กตรอนคู่ตรงข้ามกัน จะหักล้างกันหมด ส่วนวัสดุประเภทเฟอร์ริแมกเนติก เช่น Ferrites และ Magnetite จะมีการแสดงสภาพทางแม่เหล็ก เนื่องจากโมเมนต์ของอิเล็กตรอนตรงข้ามในโมเลกุลมีค่าไม่เท่ากัน

สำหรับกรณีของวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก พบว่าเมื่อมีขนาดเล็กลงจนถึง 20-30 นาโนเมตร จะเกิด “ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก” (Superparamagnetic phenomenon) ซึ่งเป็นสมบัติทางแม่เหล็กแบบใหม่ ซึ่งพบว่าจะทำให้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic particle) มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ไม่มั่นคงเนื่องจากการแปรปรวนของอุณหภูมิ โดยอนุภาคเหล่านี้จะไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่ได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก และเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กก็จะแสดงสมบัติแม่เหล็ก อนุภาคที่มีสมบัติแม่เหล็ก (Magnetic particle) มีการใช้มาตั้งแต่ช่วงกลางของปี 1970 โดยมักใช้ในด้านชีววิทยาและทางการแพทย์ คุณสมบัติแม่เหล็กเป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ใช้ในการขนส่งยา หรือการออกฤทธิ์ของสารที่ต้องการยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกในร่างกาย และการแยกทางชีวภาพ (Bioseparations) และยังมีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค และเพิ่มประสิทธิภาพการนำส่งและการทำปฏิกิริยากับเป้าหมาย ซึ่งการศึกษาในห้องปฏิบัติการนั้นแสดงให้เห็นว่า Iron nanoparticles มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของมลพิษในสิ่งแวดล้อม

2.8.2 กราฟีน

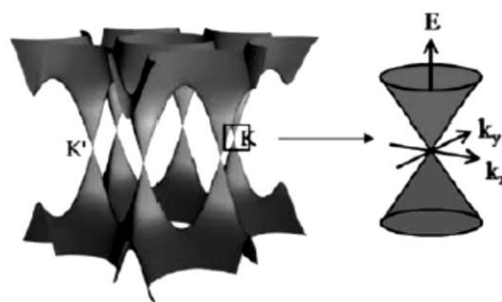
กราฟีนเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ ซึ่งจะเชื่อมคาร์บอนแต่ละตำแหน่งด้วยพันธะ sp^2 โดยคาร์บอนแต่ละวงจะมีลักษณะหกเหลี่ยมและเชื่อมต่อกันจนมีลักษณะคล้ายผลึกรวงผึ้ง สามารถนำไปใช้กับวัสดุหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า เพราะเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นทางไฟฟ้า เพื่อเชื่อมต่อสารเคมีทนต่ออุณหภูมิได้สูง จึงใช้เป็นตัวส่งสัญญาณ และนอกจากนี้เมื่อกราฟีนมีขนาดในระดับนาโน พบว่าจะมีความชอบน้ำสูง เนื้อแท้ของกราฟีน มีลักษณะเป็นวัสดุกึ่งโลหะ หรือกึ่งตัวนำ ด้วยเอกลักษณ์หรือคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า จึงมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ดีที่อุณหภูมิห้อง มีค่าเท่ากับ $15,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}$ โดยความต้านทานนั้นจะมีค่าเท่ากับ 10^{-6} ohm-cm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความต้านทานของเงิน ค่านี้อาจจะแสดงออกมา ณ อุณหภูมิห้อง โครงสร้างของ Graphene nano ribbon ชนิด Zigzag และ Armchair ล้วนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป สำหรับกราฟีนชนิด Zigzag จะเป็นโลหะ ส่วนแบบ Armchair จะเป็นได้ทั้งโลหะ หรือกึ่งตัวนำก็ได้ ซึ่งช่องว่างของแถบพลังงานใน Armchair นั้นจะผูกพันกับความกว้างของแต่ละแถบพลังงานคุณสมบัติที่ขุดเยียมทางไฟฟ้าของกราฟีนนั้นจึงเป็นที่สนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าในอนาคต เช่น Ballistic transistors ตัวรวมกระแส Electrode และ Sensor กราฟีนนั้นมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านโลหะหรือกึ่งโลหะได้ดี และมีค่าสัญญาณรบกวน (Noise signal) ต่ำ ทำให้กราฟีนเหมาะกับการเป็น Sensor ที่ดีและจากโครงสร้างสองมิติดังรูป 2.3(a) จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบการดูดซับ หรือการยึดติดของโมเลกุล นอกจากนั้นยังใช้ทำเป็น

อิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสง จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมานั้นจึงแบ่งกราฟีนออกเป็นสองกลุ่มคือ กราฟีนชั้นเดียวและกราฟีนสองชั้นโดยอันดับแรกต้องมาทำความเข้าใจโครงสร้างของกราฟีน ก่อนว่า กราฟีนชั้นเดียวมีลักษณะเป็นแผ่นระนาบสองมิติ ที่เกิดจากการต่อกันของคาร์บอน 6 อะตอมดังรูปที่ 2.3 (b) ขณะที่พันธะ δ เป็นพันธะหลักที่แกนกลางของโครงสร้าง hexagonal ส่วนพันธะ π เป็นพันธะที่ใช้เพื่อเชื่อมระหว่างชั้นของกราฟีน (Wonbong และคณะ, 2010)



รูปที่ 2.3 (a) โครงสร้างสองมิติของกราฟีนที่แสดงถึงแผ่นคาร์บอนหกเหลี่ยมมาต่อกัน
(b) แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของพันธะ δ และ π ที่ตั้งฉากกันบนระนาบของกราฟีน
(Wonbong และคณะ, 2010)

แกรฟีนชั้นเดียวจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 ที่จะเห็นการซ้อนทับกันของแถบพลังงาน นอกจากนี้ยังสามารถแสดงประจุบวกและประจุลบได้ในตัวเดียว (Ambipolar) ที่อุณหภูมิห้อง โดยประจุที่ขนส่งสามารถแลกเปลี่ยนระหว่าง hole และอิเล็กตรอนยังขึ้นกับธรรมชาติของ Gate voltage



รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึง Electronic band ของกราฟีนแบบชั้นเดียว
(Wonbong และคณะ, 2010)

ผลจาก Quantum hall ที่อุณหภูมิต่างๆ และที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีความสามารถนำไปใช้เป็น Gas sensing ได้อีกด้วย

เพราะว่าความสามารถในการดูดซับและการคายซับของ CO H₂O และ NH₃ ค่าสัญญาณรบกวน (Noise signal) ที่ต่ำ และมีค่าความเค้นและความเครียดประมาณ 1.0 TPa

กราฟีนแบบสองชั้นแสดงให้เห็นว่าไม่มีช่องว่างกับแถบพาราโบล่าสัมผัสที่ K และ K' เมื่อเทียบกับ กราฟีนแบบชั้นเดียว ดังนั้นกราฟีนแบบสองชั้นจึงถูกพิจารณาว่าเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ ในทางตรงกันข้ามกราฟีนแบบชั้นเดียวเป็นตัวพาประจุ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ Gate voltage สามารถเปลี่ยนความเข้มข้นของตัวขนส่งและบอกถึงความไม่สมมาตรระหว่างชั้นทั้งสอง อย่างไรก็ตาม ช่องว่างตรงแถบพลังงานมีค่าประมาณ 0.26 eV ที่สร้างมาจากกราฟีน เมื่อใช้วิธีการปลูกผลึกเดี่ยวบน SiC โครงสร้างกับแถบช่องว่างแบบจำกัดทำให้กราฟีนเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า พบว่าแถบช่องว่างจะลดลงเมื่อจำนวนชั้นของ กราฟีนเพิ่มขึ้นจนใกล้ศูนย์ เช่นในกรณีโครงสร้างที่มีมากกว่า 4 ชั้น โดยสารนี้จะเหนี่ยวนำการเปิดของแถบช่องว่างเนื่องจากปฏิกิริยาของกราฟีนกับสารตั้งต้นและการแตกหักของโครงสร้างผลึก ในการศึกษาที่ใกล้เคียงกันการทับถมของกราฟีนด้วยวิธีการปลูกผลึกบนคาร์บอนที่พื้นผิวของ 4H-SiC จะมีลำดับการซ้อนทับที่ต่างกันจากผลของโครงสร้าง โดยไม่คำนึงถึงจำนวนของชั้น (กรณีที่มีความหนาไม่เกิน 10 ชั้น ดังนั้นวิธีในการสังเคราะห์มีความสำคัญในการกำหนดโครงสร้างและคุณสมบัติของกราฟีน

ขอบเขตที่สนใจต่อการนำไปใช้ อาทิเช่น การดูดซับโมเลกุลของแก๊สที่พื้นผิวของ กราฟีนที่ได้จากวิธีการปลูกถ่ายผลึกเดี่ยว แสดงให้เห็นถึงการควบคุมโมเลกุลที่จะบำบัด (ตัวอย่างของแก๊สเช่น H₂ และ NO₂) สามารถกระตุ้นการย้อนกลับของโลหะให้เปลี่ยนเป็นฉนวนได้ ในกราฟีนแบบชั้นเดียวและสองชั้น การบำบัดแผ่นกราฟีนโดยไฮโดรเจนอะตอมเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการทำนวนหรือที่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบสองมิติ นอกจากนี้กราฟีนแบบชั้นเดียวและสองชั้นยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะโปร่งแสงในช่วงคลื่นแสงอุตราไวโอเล็ต จนถึงอินฟราเรด จึงเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสงในแผงพลังงานเซลล์สุริยะ

คุณสมบัติของกราฟีนชนิดหลายชั้น การวิเคราะห์โครงสร้างของแถบกราฟีนชนิดสองชั้น (Few-layer graphene, FLG) จะเห็นได้ว่าไม่มีช่องว่างของแถบพลังงาน จึงบอกโดยนัยได้ว่าความเป็นโลหะจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของ FLG และยังมีพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับ SLG จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการเป็นดูดซับก๊าซที่ดี เมื่อทำการตรวจสอบด้วย H₂ และ CO₂ ที่ 300 K และ 100 bar จากตัวอย่างของ FLG พบว่ามีการดูดกลืน H₂ 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าสูงมาก

FLG มีสมรรถนะที่ดีในการใส่หมู่ฟังก์ชันทั้งที่เป็นพันธะโควาเลนต์และไม่เป็นโควาเลนต์ตามลำดับการละลายในตัวทำละลายชนิดต่างๆ การเติมหมู่เอมีนให้กับ FLG พบว่าการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น Carbontetrachloride (CCl₄) Dichloromethane (DCM) และยังพบว่าสามารถละลายน้ำได้หลังจากทำปฏิกิริยากับ H₂SO₄ และ HNO₃ เข้มข้น อย่างไรก็ตามการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยพันธะโควาเลนต์จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เป็น Non-covalent จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นโดยนำไปเคลือบด้วย Polyethyleneglycol (PLG) เพื่อให้ตัวดูดซับละลายในน้ำโดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และยังทำให้โครงสร้างของกราฟีนมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเติมหรือตกแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยอนุภาคโลหะขนาดนาโนเช่น Pt, Ag และ Au nanoparticles ด้วยวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีแบบขั้นตอนเดียว (Single step chemical) การดัดแปลงทางเคมีของกราฟีนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ กราฟีน

เนื่องจาก edge ที่เปลี่ยนไป ดังนั้นกราฟีนจึงเป็นที่น่าสนใจในไม่กี่ปีที่ผ่านมา จึงศึกษาและทำความเข้าใจในปฏิกิริยาของกราฟีนกับ DNA nucleobase และ Nucleoside ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว FLG ได้ถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของอิเล็กทรอนิกส์ใน Li-ion แบตเตอรี่ รุ่นใหม่เนื่องจากมีความสามารถที่จะทำปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้าเคมี โดยเมื่อเทียบค่าพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพบว่าได้ค่าที่ดีกว่า กราไฟต์ หรือ Activated carbon เมื่อนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของแบตเตอรี่พบว่าสามารถเพิ่มศักยภาพให้กับแบตเตอรี่ได้ นอกจากนี้ยังมีการนำกราฟีนไปใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน เช่นแบตเตอรี่ และตัวเก็บพลังงานจากความหลากหลายของกราฟีนไม่ว่าจะเป็น หนึ่งชั้น สองชั้น หรือหลายชั้นก็ตาม ล้วนมีความสามารถในการเชิงไฟฟ้าทั้งนี้จึงนำไปประยุกต์ใช้ทางชีวภาพ ตัวตรวจจับสัญญาณ และที่เก็บพลังงาน โดยวิธีในการสังเคราะห์จะเป็นตัวควบคุมโครงสร้าง และคุณสมบัติของกราฟีน ซึ่งวิธีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์จะกล่าวในลำดับต่อไป

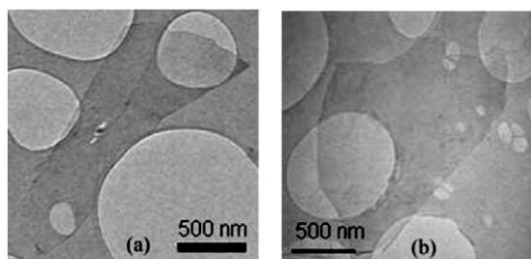
2.8.2.1 วิธีในการสังเคราะห์กราฟีน

การสังเคราะห์กราฟีนแบบชั้นเดียวได้เริ่มมีการทำในช่วงคริสต์ทศวรรษ 1975 แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวของกราฟไฟต์แบบชั้นเดียวและหลายชั้นด้วยวิธีการสลายตัวโดยใช้ความร้อน (Dermal decomposition) จากผลึกเชิงเดี่ยวของแกรไฟต์ชั้นเดียว อย่างไรก็ตามเนื่องจากขาดความสอดคล้องของ การรวมตัวบนระนาบของผลึกที่ต่างกัน และความล้มเหลวในการประยุกต์ใช้ของผลิตภัณฑ์ รวมถึงยังมีผู้ทำการวิจัยไม่มากนัก เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ยุ่ยยากและได้ปริมาณน้อยต่อการสังเคราะห์ในแต่ละครั้ง จึงมีความพยายามที่จะเพิ่มปริมาณกราฟีนที่ได้ และลดความยุ่งยากในการสังเคราะห์ ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมมีดังต่อไปนี้

ก. วิธีการลอกออกเป็นแผ่น (Exfoliation and cleavage)

กราฟไฟต์เป็นชั้นของกราฟีนที่กองซ้อนกัน เชื่อมต่อกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นหลักการคือ มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตกราฟีนจากแผ่นกราฟไฟต์ที่มีความบริสุทธิ์สูงเมื่อพันธะแตกออก วิธีการลอกออกเป็นแผ่นใช้กลไกหรือพลังงานทางเคมีในการสลายพันธะเพื่อให้ได้แผ่นกราฟีน ซึ่งถือได้ว่าเป็นความพยายามครั้งแรกโดย ใช้โลหะโพแทสเซียมสอดแทรกที่แผ่นของกราฟไฟต์ แล้วทำการลอกด้วยเอทานอล เพื่อที่จะให้เกิดการแยกของแผ่นคาร์บอน จากนั้นนำไป Sonicate จะทำให้แผ่นนาโนคาร์บอนหลุดออกมา เมื่อวิเคราะห์ด้วย TEM จะพบว่าในแต่ละแผ่นมีความหนา 40 ± 15 ชั้น จากกระบวนการดังกล่าวจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น FLG

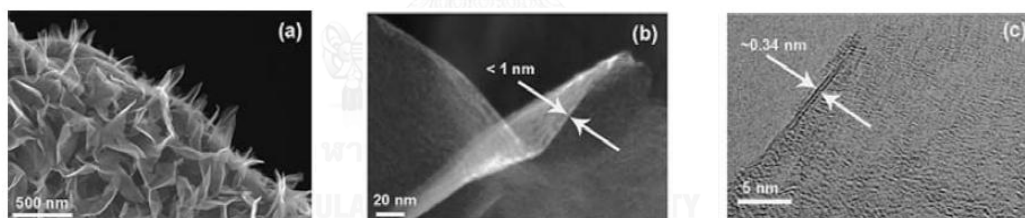
โดยกระบวนการ Exfoliation เป็นการลอกเข้าไปเรื่อยๆ คล้ายกับการลอกออก จากแผ่น กราไฟต์ ส่วนบางๆที่แตกออกมาจะปล่อยออกมาใน Acetone และถูกส่งไปยัง Si ซึ่งพบว่า จะมีทั้งกราฟีนแบบชั้นเดียวและสองชั้น วิธีนี้จึงเหมาะกับการทำในสเกลขนาดใหญ่ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงภาพถ่ายของ High resolution transmission electron microscopy (HRTEM)
(Wonbong และคณะ, 2010)

ข. วิธีการตกสะสมไอสารเคมี (Thermal chemical vapor deposition technique , CVD)

การสังเคราะห์กราฟีนผ่านวิธีการตกสะสมไอสารเคมี (CVD) เป็นวิธีที่ค่อนข้างใหม่ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการสังเคราะห์กราฟีนแบบหลายชั้นด้วยวิธี CVD ข้อดีคือผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สารตั้งต้นราคาถูก เป็นกระบวนการที่สารตั้งต้นสัมผัสกับแก๊สบนพื้นผิวที่ทำการปลูกชั้นฟิล์มขณะที่ทำการระเหย (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์แผ่นกราฟีนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio frequency, RF)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตกสะสมไอสารเคมี (a) รูปถ่ายกราฟีนด้วย SEM บนส่วนโค้งของผิว Ni (b) ภาพขยายของ SEM บนส่วนโค้งของผิว Ni (c) ภาพถ่าย HRTEM ที่แสดงถึงแผ่นกราฟีนแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่ต่อเนื่องกัน

(Wonbong และคณะ, 2010)

ซึ่งการสังเคราะห์จะทำได้หลายแบบ เช่นการให้ความร้อนตัวอย่างกับเส้นใยหรือกับพลาสมา กราฟีนสามารถขยายได้โดยการสัมผัสกับแผ่นนิเกิล (Ni) ที่ผสมกับแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) และ อาร์กอน (Ar) ที่ 1,000 องศาเซลเซียส การสลายของมีเทน (CH_4) บนพื้นผิวด้วยการระเหยไฮโดรเจน และการกระจายของคาร์บอนบนผิวของนิเกิล โดยลดอุณหภูมิลงด้วยอาร์กอน ชั้นของกราฟีนจะขยายบนพื้นผิว ซึ่งกระบวนการนี้คล้ายกับการกระจายตัวบนพื้นผิวของนิเกิล ดังนั้น

จำนวนชั้นโดยเฉลี่ยจะขึ้นกับความหนาของนิเกิล วิธีนี้จึงสามารถควบคุมความหนาได้นอกจากนั้นยังสามารถควบคุมรูปร่างของกราฟีนที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย

ค. ชั้นตอนแยก (Dispersion method)

กราฟีนสามารถเตรียมได้ในสภาวะที่เป็นของเหลวจึงสามารถอัปสเกลการผลิตได้เพื่อให้ได้ปริมาณกราฟีนที่สูงขึ้น วิธีที่ง่ายที่สุดคือการกระจายกราฟไฟต์ในตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นผลให้ขอบโลมีพลังงานลดลงเพื่อป้องกันการลอกกราฟีนออกจากผลึก แล้วนำสารละลายที่ได้ไป Sonicate อีกอย่างน้อยร้อยชั่วโมง หรือใช้กระแสไฟฟ้า จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไป Centrifuge เพื่อกำจัดสะเก็ดที่ยังคงสภาพผลึก โดยปริมาณของกราฟีนที่ได้ค่อนข้างสูง แต่ขนาดเล็กมากทำให้การควบคุมเป็นไปได้ยาก แต่การสังเคราะห์จากที่กล่าวมาไม่ยุ่งยากจึงเหมาะกับการทำสเกลขนาดใหญ่

ง. การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีสมบัติแม่เหล็ก (Petcharoen และคณะ, 2012) อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เป็นสารประเภทเฟอร์ริคแมกเนติกขนาดนาโนที่มีโครงสร้างเป็น Cubic inverse spinal structure สารแมกนีไทต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวงการแพทย์ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก และมีสนามแม่เหล็กหนาแน่น

2.8.2.2 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยมีแรงกระทำระหว่างตัวกลางดูดซับและมลสาร แต่อาจเกิดขึ้นอย่างไม่ทั่วถึงทั้งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดการดูดซับขึ้นในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งการดูดซับนั้นอาจเกิดเนื่องมาจากแรงทางประจุ หรือปฏิกิริยาเคมี

การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้แก่ตัวกลางดูดซับ และเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการเลือกดูดซับมลสารแต่ละชนิด ซึ่งการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวนี้นี้จะได้ผลดีเป็นพิเศษกับตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ที่มีลักษณะทางเคมีบนพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

ก. การต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (Post-synthetic grafting) การต่อติดหมู่ฟังก์ชันเป็นการนำหมู่ฟังก์ชันทางเคมี เช่น อะมิโน, เมอร์แคปโต และไฮดรอกซิล มายึดบนผิวของตัวกลางดูดซับแล้วต่อกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเดิม ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและคงไว้ซึ่งโครงสร้างเดิมของตัวกลางดูดซับการต่อติดหมู่ฟังก์ชันนี้มีข้อเสียคือยากที่จะควบคุมความเข้มข้นและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันที่ทำการต่อติดเข้าไป และการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเฉพาะบนพื้นผิวด้านนอกและภายในรูพรุนที่สารตัวกลางปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันสามารถเข้าถึงได้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การต่อติดหมู่ฟังก์ชันก็มีข้อดีคือจะยังรักษาโครงสร้างของตัวกลางดูดซับหลังจากที่ทำการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน

ข. การควบแน่นร่วม (Co-condensation or direct synthesise) การควบแน่นร่วม จะเป็นการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไปพร้อมกับการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่สามารถใช้ได้กับทั้งหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยมีข้อดีของการควบแน่นร่วมคือเกิดการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอย่างทั่วถึงทั้งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและสามารถรับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ได้มากกว่าวิธีการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ถึงแม้ว่าการควบแน่นร่วมนี้จะทำให้สูญเสียโครงสร้างของสารตั้งต้นไปบางส่วน เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของตัวกลางดูดซับใหม่ จากการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยการควบแน่นร่วมหมู่ฟังก์ชันอะมิโน หมู่ฟังก์ชันอะมิโน มีคุณสมบัติเป็นเบส (pH = 8) ชอบน้ำ และเป็น Building block ของโปรตีน มักนิยมใช้ในการนำมาปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ เพื่อเพิ่มความชอบน้ำ และทำให้พื้นผิวเป็นประจุบวก เนื่องจากเมื่อละลายน้ำจะได้รับโปรตอนจากน้ำ

2.9 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

2.9.1 โครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Powder X-ray diffractometer (XRD) และ Rigaku DMAX 2200 Powder X-ray diffractometer equipped with $\text{Cu K}\alpha$ radiation โดยใช้ Scanning rate $1,000 \text{ DEG min}^{-1}$ ในช่วง $0.5^\circ - 6.0^\circ$ (2θ) (Punyapalakul และคณะ, 2006)

2.9.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

ในการวิเคราะห์การต่อติดของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณไนโตรเจนโดยใช้ เครื่อง CHNS-O analyzer ของ Thermo scientific TTM รุ่น FLASH 2000

2.9.3 ลักษณะพื้นที่ผิว

การตรวจวัดลักษณะพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน มีกำลังขยายละเอียดมากถึง 10-30,000 เท่า การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน คือจะมีอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากต้นกำเนิด แล้วถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ผ่านสนามไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ จึงทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนน้อยกว่าความยาวของคลื่นแสงมาก รวมถึงการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบ และมีสนามแม่เหล็กอยู่รอบตัวในทิศทางตั้งฉาก ขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ จึงได้นำคุณสมบัติตรงนี้ในการบังคับการเบี่ยงเบนของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีประโยชน์ในการเพิ่มกำลังขยายของเลนส์ภายในกล้อง โดยที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนจะใช้ในการศึกษาโครงสร้างหรือองค์ประกอบต่างๆ ในวัตถุตัวอย่าง โดยการกวาดลำอิเล็กตรอนไปบนพื้นผิว ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับที่อยู่ภายใน จะทำให้อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกจากวัตถุนั้น มาแสดงผลบนจอโทรทัศน์เป็นภาพสามมิติที่สามารถบันทึกภาพได้ ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมี

การทำงานที่เหมือนกับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน แต่แตกต่างที่ระบบการแสดงผลของภาพ โดยส่งสัญญาณภาพที่ได้เพื่อนำไปขยาย แล้วแปลภาพลงจอซีอาร์ที (CRT) จึงสามารถดูได้ด้วยตาเปล่า และบันทึกได้ ในเรื่องความสว่างของภาพนั้นจะขึ้นกับพื้นผิวของวัตถุ โดยถ้าพื้นผิวมีความเรียบมาก ภาพก็จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้เลนส์ใกล้วัตถุยังมีช่องสำหรับรับแสงเพื่อช่วยในการเพิ่มความลึกของภาพ หากติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเสริมอาจตรวจสอบตัวอย่างได้มากขึ้น เพื่อบอกรายละเอียดของภาพร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนลึกกว่าที่กล้องอิเล็กทรอนิกส์ชนิดทิวติยุมิจะตรวจสอบได้ เพื่อใช้ในการหาปริมาณและคุณภาพโมเลกุลของธาตุ (Puchmark, 2013)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การกำจัด MT

(Cai และคณะ, 2014) ศึกษาตัวกลางดูดซับ ทั้ง 3 ชนิด Graphene oxide (GO), Granular activated carbon (GAC) และ Multiwalled carbon nanotube (MWCNTs) เพื่อดูขนาดอนุภาค พื้นผิวจำเพาะ และความสามารถในการดูดซับ Carbamazepine กับสารที่รบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Endocrine disrupting compounds, EDC) อีก 9 ชนิด เพื่อหาพลังงานจลน์ในการดูดซับของ Carbamazepine และ EDCs ด้วยตัวกลางดูดซับทั้งสามชนิดผลปรากฏว่า กราฟีนออกไซด์จะดูดซับมลสารดังกล่าวด้วยพันธะ $\pi-\pi$ ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นจากการชนกันที่ผิวข้างของออบิทอล สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ด้วย Freundlich isotherm นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พื้นผิวสูงสุดของกราฟีนออกไซด์เท่ากับ $771 \text{ m}^2/\text{g}$ และเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพีเอช จะทำให้ประจุบนผิวของตัวกลางดูดซับเป็นลบ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับมลสารที่มีประจุลบจึงลดลง แต่ความสามารถในการดูดซับมลสารที่มีประจุบวกจะเพิ่มขึ้น และกราฟีนออกไซด์ยังมีช่วง pH ในการดูดซับกว้าง ปฏิกิริยาการดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และเมื่อนำไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ยังพบว่าสามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวกลางดูดซับได้

(ฉมนรี สุขเกษม, 2556) ได้ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซิลิกา ต่อการดูดซับ 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรน หมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการดูดซับแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงหมู่ฟังก์ชันและพีเอชที่จุดสมมูลของตัวกลางดูดซับ

(ฉนวนรี สุขเกษม, 2556)

	หมู่ฟังก์ชัน	pH _{zpc}
SBA-15	ซิลานอล	4.9
A-SBA-15	อะมิโน	9.3
M-SBA-15	เมอร์แคปโต	5.0
O-SBA-15	ออกทิล	5.1
P-SBA-15	ฟินิล	6.1

หมายเหตุ ซิลิกาชนิดรูพรุน (SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่อะมิโน (A-SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่เมอร์แคปโต (M-SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่ออกทิล (O-SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่ฟินิล (P-SBA-15)

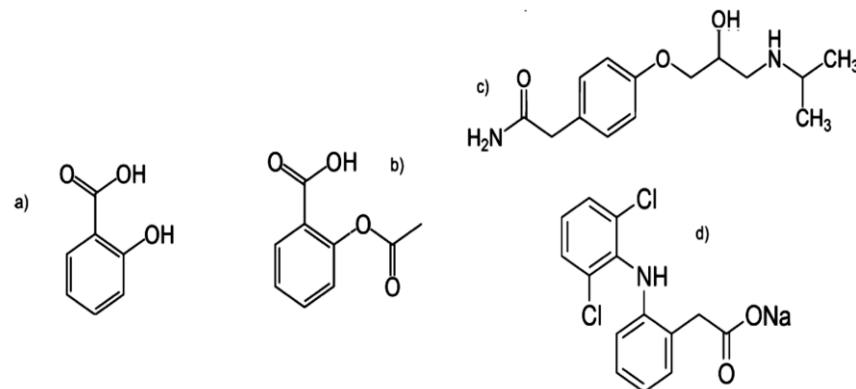
จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักของการดูดซับคือความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ไม่ใช่พื้นที่จำเพาะบนผิวตัวกลางดูดซับ จากผลที่แสดงต่อไปนี้ O-SBA-15 > M-SBA-15 > P-SBA-15 > SBA-15 > A-SBA-15 และค่ามุมสัมผัสของ ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่ออกทิล (O-SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่เมอร์แคปโต (M-SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่ฟินิล (P-SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุน (SBA-15) ซิลิกาชนิดรูพรุนที่ต่อกับหมู่อะมิโน (A-SBA-15) เท่ากับ 89.93 89.65 77 44.19 และ 44.18 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า MT สามารถดูดซับได้ดีกับตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ เนื่องจากแรงแผ่กระจาย หรือแรงลอนดอน ซึ่งเป็นแรงระหว่างสารที่ไม่มีขั้ว ส่วน A-SBA-15 มีความสามารถในการดูดซับ MT ได้น้อยที่สุดเนื่องจากสมบัติความชอบน้ำ โดยพื้นผิวจะสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่า MT หรือเกิดการแข่งขันการดูดซับระหว่างโมเลกุลของน้ำกับ MT นอกจากนี้พื้นที่ผิวบางส่วนของ A-SBA-15 เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนกับหมู่ซิลานอล จึงทำให้ A-SBA-15 มีหมู่ฟังก์ชันอิสระลดลง ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นยังขัดขวางรูพรุนอีกด้วยทำให้ความสามารถในการดูดซับ MT ลดลง

(Zhang และคณะ, 2009) มีการศึกษาการดูดซับและการลดลงของเทสโทสเตอโรนในดิน จากการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของเทสโทสเตอโรนอยู่ในดินมากกว่าในน้ำ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับเทสโทสเตอโรนในน้ำหรือดินได้ โดยการศึกษาครั้งนี้จะนำดินจากการเกษตร ที่ความลึก 3 นิ้ว จากผิวดิน มาใช้เป็นตัวกลางดูดซับเพื่อทดลองการดูดซับและคายซับของเทสโทสเตอโรน โดยการทดลองจะเป็นแบบที่ละเทเพื่อหาสมมูลการดูดซับด้วย Langmeir และ Freundlich model เมื่อเทียบกับ r^2 การดูดซับมีแนวโน้มเป็นแบบ Freundlich isotherm แล้วเมื่อนำมาทดสอบการคายซับโดยการล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งพบว่าเทสโทสเตอโรนหลุดออก 35.14-102.35 เปอร์เซ็นต์ ของเทสโทสเตอโรนที่ดูดซับบนผิวดิน จากความสัมพันธ์ของการดูดซับและคุณสมบัติของดินในด้านการเปลี่ยนแปลงไอออน พื้นที่ผิว และสารอินทรีย์ในดิน จึงสรุปได้ว่าความลึกของดินมีผลต่อการดูดซับ และการคายซับของเทสโทสเตอโรน

(Hu และคณะ, 2011) ได้ศึกษากระบวนการออกซิเดชัน (Advance oxidation process, AOPs) ร่วมกับการใช้โอโซน (Ozone) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ยูวี (UV) และ Ultrasound โดยกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับไฮดรอกไซด์เรดิคัล ($OH\cdot$) ที่เป็นตัวทำลายโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ รวมไปถึง EDCs โดย $OH\cdot$ จะเข้าไปทำลายสารประกอบอินทรีย์แบบไร้ทิศทางจนกระทั่งได้เป็นแร่ธาตุ โดยปฏิกิริยาที่นิยมของกระบวนการ AOPs คือ ปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นกระบวนการออกซิเดชันที่ได้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่สูง ที่สำคัญสามารถดำเนินการได้ง่ายและวัตถุที่ใช้ราคาไม่สูง การแบ่งประเภทสารเฟนตันสามารถแบ่งออกเป็นสารละลายเนื้อเดียวของเหล็กไอออน และ H_2O_2 ซึ่งจะมีประสิทธิภาพที่ดีในช่วง $pH < 4$ และจะไม่มีประสิทธิภาพเมื่อ pH สูงกว่าแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ($pH 5-9$) ข้อด้อยของเฟนตันแบบเนื้อเดียวคือการกำจัดตะกอนเหล็กหลังจากการบำบัดแล้วเป็นไปยาก เพื่อที่จะเอาชนะปัญหาตรงนี้จะพัฒนาเป็นคอลลอยด์แบบเนื้อผสมที่รวมเหล็กเข้าไปด้วย โดยทำการห่อหุ้มเหล็ก ข้อดีของเฟนตันแบบเนื้อผสมคือสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ในช่วง กว้างและมีการสูญเสียเหล็กน้อยกว่าแบบเฟนตันเนื้อเดียว สำหรับกระบวนการแบบเนื้อผสมนี้ ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าคอลลอยด์เฟนตันแบบเนื้อผสม ($Fe_3O_4/MWCNT$) เตรียมได้โดยการนำ Fe_3O_4 มาติดบน MWCNTs ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงแม้ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำๆ นอกจากนี้ $Fe_3O_4/MWCNT$ ยังสามารถใช้เพื่อเป็นตัวดูดซับและช่วยในการสลายตัวของ MT ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ได้อาศัยหลักการคล้ายกับปฏิกิริยาเฟนตัน โดยกระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นที่ผิวของแคตตาลิสต์กับเหล็กที่ละลายออกมา และยังใช้ผลจากประจุบวกของเฟนตันแบบเนื้อผสมในการดูดซับมลสารที่มีประจุลบ ซึ่ง $Fe_3O_4/MWCNT$ ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีโครงสร้างที่เสถียร และมีปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยที่หลุดออกขณะทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพการดูดซับ จึงสามารถนำมาใช้ได้หลายครั้ง

(Rakić และคณะ, 2015) ได้ศึกษาการกำจัด Pharmaceutically active compounds (PACs) ด้วยแอคติเวตคาร์บอน (ACs) ทั้ง 3 ชนิด คือ แอคติเวตคาร์บอนชนิดเกล็ดที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นเบส (C-1), แอคติเวตคาร์บอนชนิดผงที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นกรด (C-2) และแอคติเวตคาร์บอนชนิดผงที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นเบส (C-3) ส่วนมวลสารที่จะดูดซับมี 4 ชนิด คือ (a) Salicylic acid, (b) Acetylsalicylic acid, (c) Atenolol และ (d) Diclofenac-Na ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า C-2 มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุด



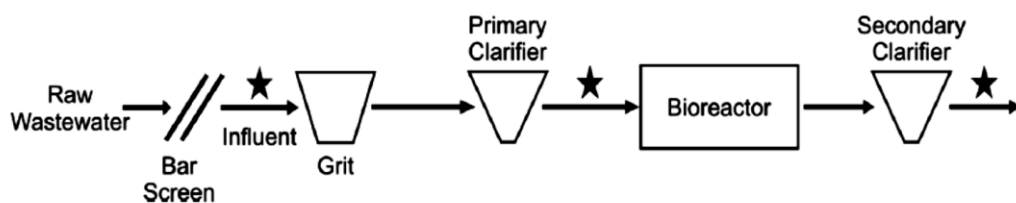
รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของ PACs : (a) Salicylic acid

(b) Acetylsalicylic acid (c) Atenolol และ (d) diclofenac-Na

(Rakić และคณะ, 2015)

เนื่องจากผลของประจุบวกที่อยู่บนตัวดูดซับจับกับหมู่ฟังก์ชันบน PACs ทำให้สามารถจับได้ดีกับ Salicylic acid (a) Acetylsalicylic acid (b) Atenolol (c) ที่สามารถแสดงประจุลบออกมา แต่จะมีปัญหาในเรื่องของ พีเอช และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับนั้นค่อนข้างแคบ และประสิทธิภาพของตัวกลางดูดซับเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพ

(Wojnarowicz และคณะ, 2014) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของ ฮอร์โมน และสารที่ระงับการทำงานของต่อมไธสมอง (EDCs) ที่ความเข้มข้นในช่วง ng- μ g ด้วยวิธีบำบัด โดยทั่วไปจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดตามรูปที่ 2.8 โดยมี 3 ขั้นตอนหลักดังนี้ 1. การบำบัดขั้นต้น เป็นการใช้ตะแกรงเพื่อดักขยะหรือของเสียขนาดใหญ่ 2. การบำบัดขั้นปฐมภูมิ เพื่อกำจัดของแข็ง 3. การบำบัดขั้นทุติยภูมิ เป็นการบำบัดทางชีวภาพเพื่อย่อยสลายสารประกอบที่ไม่ต้องการ จากผลการบำบัดพบว่าสามารถกำจัดฮอร์โมนและ EDCs ออกไปได้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ซึ่งถือได้ว่าระบบการบำบัดแบบทั่วไปนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะกำจัดสารปนเปื้อนเหล่านี้

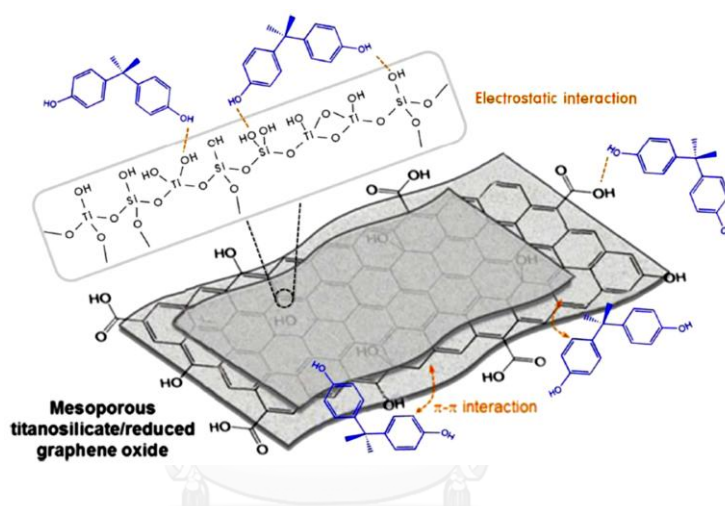


รูปที่ 2.8 แสดงการบำบัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน (Conventional process)

(Wojnarowicz และคณะ, 2014)

(Nguyen-Huy และคณะ, 2014) ศึกษาปฏิกิริยาการดูดซับของ Bisphenol A (BPA) ด้วยซิลิกาชนิดรูพรุนต่อติดกราฟีนออกไซด์ และตรวจวัดปฏิกิริยาการดูดซับของ BPA ด้วย FTIR และ Raman spectroscopy ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า BPA ถูกดูดซับเนื่องจาก 2 ปัจจัยหลัก

1. พลังงานสถิตย์ระหว่าง Hydroxyl group ของ BPA ซิลิกาชนิดรูพรุน และกราฟีนออกไซด์
2. พันธะ π - π ระหว่างวงเบนซีนของ BPA และ ลักษณะโครงสร้างแบบระนาบ (SP^2) ของกราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการดูดซับของ BPA บนซิลิกาชนิดรูพรุน และกราฟีนออกไซด์

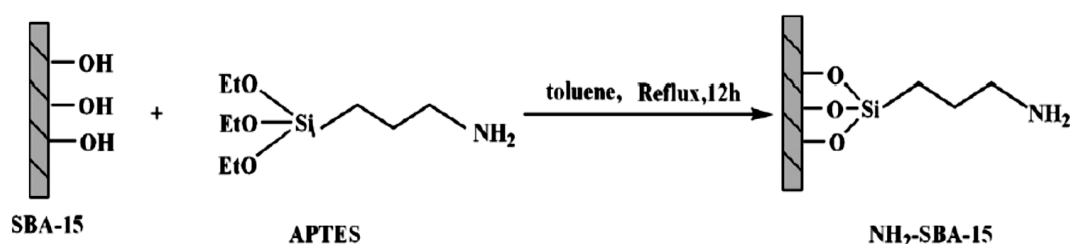
(Nguyen-Huy และคณะ, 2014)

2.10.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

(Pourjavadi และคณะ, 2015) ได้ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ต่อกับอนุภาคแมกเนติก โดยโครงสร้างพื้นฐานกราฟีนออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวมากและมีความไม่ชอบน้ำสูงทำให้สามารถจับกับสารประเภทอะโรมาติกได้ดี ด้วยพันธะ π - π และทำการต่อกับอนุภาคแมกเนติกเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ได้ด้วยวิธี Inverse chemical precipitation โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ดังนี้ นำ GO ที่สังเคราะห์ได้มาละลายในน้ำกลั่นจากนั้นเติม $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ และ $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ลงในสารละลาย 30% ammonia ภายใต้สภาวะที่มีการเติมไนโตรเจน เพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ของอนุภาคแมกเนติก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นตะกอนสีดำ ($GO@Fe_3O_4$) แล้วนำไปเก็บในสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียส

(Liu และคณะ, 2004) ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนเคลือบด้วยซิลิกา (Magnetite silica nanoparticles) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ในสารละลาย NH_4OH โดยจะได้ Magnetite (Fe_3O_4) จากนั้นทำการเคลือบด้วยซิลิกา โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ และ $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ มาละลายในน้ำกลั่น พร้อมกวนตลอดเวลาแล้วเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% (30% NH_4OH) ปริมาณ 1.25 มิลลิลิตร โดยคุมอุณหภูมิของสารละลาย Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่ $80\text{ }^{\circ}C$ จะได้ตะกอนสีดำแล้วแยกด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวรแล้วนำ SP ไปละลายใน 2-Propanol กับน้ำกลั่น จากนั้นนำไปกวนต่อแล้วจึงเติม 30% NH_4OH ตามด้วย Tetraacetyl ortrosilicate (TEOS) แล้วนำไปกวนต่ออีก 6 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วแยกตัวกลางดูดซับด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวร

(Wang และคณะ, 2012) ศึกษาผลจากการเติมหมู่อะมิโนบนซิลิกาชนิดรูพรุน (NH_2-SiO_2) ด้วยการกวน จากนั้นทำให้แห้งด้วย สารลดแรงตึงผิวพูนโรนิก P123 และ Tetraethylthosilicate (TEOS) ในสภาวะกรด โดยวิธี Post-grafting กับ Gamma-aminopropyl triethoxysilane (APTES) ตามวิธีของ (Wang และคณะ, 2012) หมู่อะมิโนจะถูกต่อเข้ากับผิวของรูพรุนของซิลิกา ด้วยการรีฟลักซ์ SBA-15 และ APTES ในทุโลอินแห้งภายใต้สภาวะไนโตรเจนเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น $NH_2-SBA-15$ ดังรูปที่ 2.10



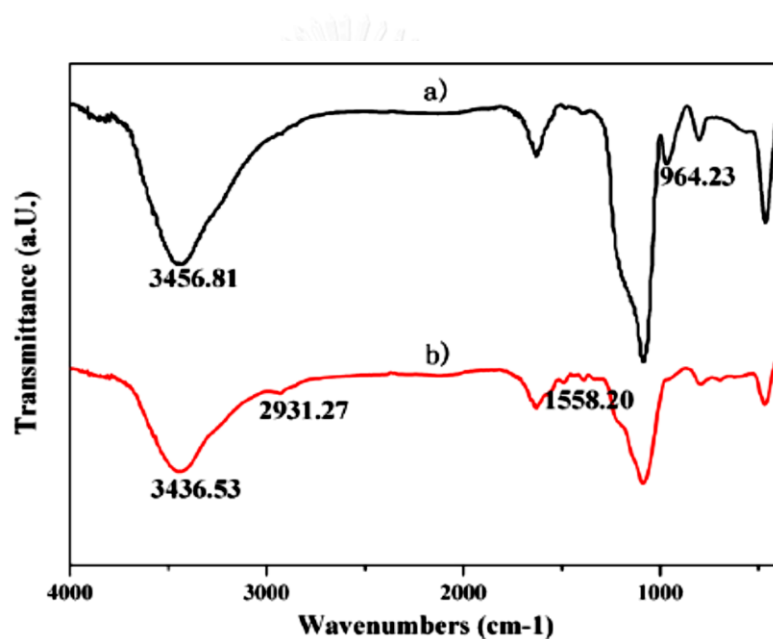
รูปที่ 2.10 การต่อหมู่อะมิโนที่ผิวของซิลิกา

(Wang และคณะ, 2012)

โดยตรวจวัดลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับด้วย Transmission electron microscopy (TEM) Fourier transform infrared/Raman (FT-IR/Raman) spectroscopy และ X-ray diffractometer (XRD) ซึ่งตัวกลางดูดซับที่ใช้คือ SBA-15 และ A-SBA-15 ผลจาก TEM และ XRD แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างซิลิกาชนิดรูพรุนไม่เปลี่ยนแปลงแล้วเมื่อวิเคราะห์ด้วย FT-IR ดังรูป 3.11 จะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นดังตาราง 2.9

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับ SBA-15 และ A-SBA-15 จาก FTIR (Wang และคณะ, 2012)

หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Si-O-Si	1250-1020
OH-stretching	3400
CH ₂ -aliphatic	1500-1300
C-H stretching	2931.27
Si-O-(H...H ₂ O)	964.23
NH ₂	1560



รูปที่ 2.11 FT-IR spectra of (a) SBA-15 and (b) NH₂-SBA-15.

(Wang และคณะ, 2012)

ผลจาก FTIR (รูป 2.13) ให้เห็นการดูดซับที่ความยาวคลื่น 2931.27 cm⁻¹ จากสายโซ่ตรง (C-H stretching) ของ NH₂-SBA-15 ไม่พบว่ามีพีค ที่ 964.23 cm⁻¹ รวมถึงการปรากฏพีคที่ 1560 cm⁻¹ จึงยืนยันได้ว่า NH₂ ติดบน SBA-15 อย่างแน่นอน

(Li และคณะ, 2015) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ ซิลิกาชนิดรูพรุนต่อติดกราฟีนออกไซด์ (GO-SBA-15) โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำ SBA-15 ที่สังเคราะห์ได้มาต่อติดกับ GO โดยใช้หมู่อะมิโนที่ติดบน SBA-15 (NH₂-SBA-15) และหมู่คาร์บอกซิลของ GO ในการเชื่อมต่อกับหมู่อะมิโนของ NH₂-SBA-15 ได้ผลผลิตเป็น GO-SBA-15 ดังรูปที่ 3.12 โดยใช้ N-N'-dimethylcarbodiimide

(DCC) และ Dimethylformamide (DMF) ถูกใช้เป็น Coupling agent และตัวละลายอินทรีย์ตามลำดับ ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลบน GO จะทำปฏิกิริยากับ DCC โดยใช้ DMF เป็นตัวกลางในการกระตุ้น จากนั้นจึงนำไปต่อติดกับ NH₂-SBA-15 แล้วนำไปวิเคราะห์ลักษณะตัวกลางดูดซับด้วย Scanning electron microscopy (SEM) X-ray diffraction (XRD) และ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

จากผลการทดลอง AFM image ของแผ่น GO มีความหนาประมาณ 1.26 nm ส่วน SEM image ของแผ่น GO มีลักษณะเป็นพื้นเรียบ โดยทิศทางของ SBA-15 ที่ต่อติดกับ GO จะมีทั้งขนานและตั้งฉากกับรูพรุน ดังค่า 2α ที่แสดงในตาราง 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงค่า 2α จากการตรวจวัดด้วย XRD

(Li และคณะ, 2015)	
ตัวกลางดูดซับ	2α
GO	9.56
GO-SBA-15	26.19
NH ₂ -SBA-15 และ GO-SBA-15	0.5-2.5

การตรวจวัดด้วย FT-IR จะใช้เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนตัวกลางดูดซับ แสดงได้ดังตาราง 2.11

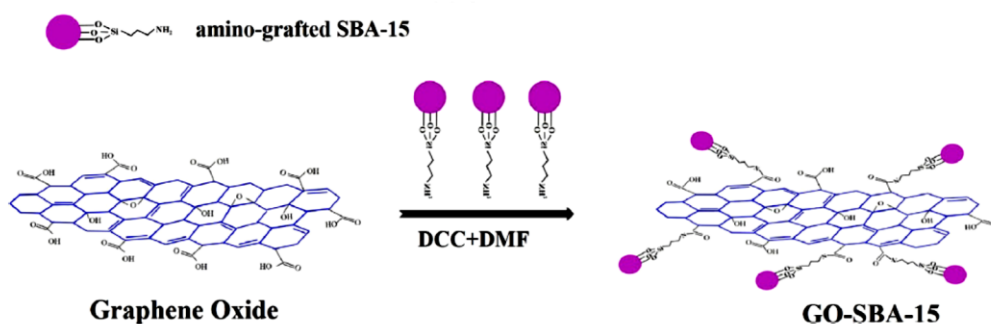
ตารางที่ 2.11 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนตัวกลางดูดซับ

(Li และคณะ, 2015)	
หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Hydroxyl group	3416
C-H stretching of NH ₂ -SBA-15	2870
C-H stretching of GO-SBA-15	2938
Si-O-Si	1100
-NH ₂	1730
C=O stretching	1420

เมื่อตัดแปลงหมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับจะพบพีคที่ 1730 และ 1420 cm⁻¹ ซึ่งสามารถยืนยันว่า NH₂-SBA-15 ต่อติดกับ GO ส่วนผลจากค่าพีเอช พบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงพีเอช 3-4 และยังคงความสามารถในการดูดซับได้ดีในช่วงพีเอช 4-7 แต่เมื่อพีเอชต่ำกว่า 3 การดูดซับจะลดลงเพราะไม่เกิดการแยกออกของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ และเกิดการแข่งขันระหว่าง H⁺ และ Pb²⁺ บนตำแหน่งเดียวกัน สำหรับที่พีเอชสูงกว่า 4 ความสามารถในการดูดซับ Pb²⁺ จะใช้แรงไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิว

ของ GO-SBA-15 และ Pb^{2+} ในสารละลาย นอกจากนี้ที่พีเอช 7 เกิดการฟอร์มตัวของ Hydroxide complex ดังนั้นจึงเลือกทำการทดลองที่พีเอช 5 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด

สมดุลการดูดซับเป็นไปตาม Langmuir models แสดงว่าเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จนพลศาสตร์เป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าเกิดการดูดซับเชิงเคมีการดูดซับจำเพาะ เพื่อทดสอบในสารผสมที่มีโลหะชนิดอื่น ลิเทียม (Li(I)) โซเดียม (Na(I)) โพแทสเซียม (K(I)) แคลเซียม (Ca(II)) แมกนีเซียม (Mg(II)) แคดเมียม (Cd(II)) โครเมียม (Cr(III)) โคบอลต์ (Co(II))ปรอท (Hg(II)) เฟอร์ริก (Fe(III)) อาเซนิก (As(III)) แมงกานีส (Mn(II)) นิกเกิล (Ni(II)) และ ซิงค์ (Zn(II)) ทำการทดลองที่พีเอช 5 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ตัวกลางดูดซับ GO-SBA-15 จะดูดซับ Pd^{2+} ได้ดีที่สุด เนื่องจาก Pd^{2+} มีแรงดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระบนออกซิเจนและไนโตรเจนได้แข็งแรง และอยู่ในฟอร์มสารเชิงซ้อนที่เสถียรที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะไอออนชนิดอื่น แสดงโครงสร้างดังรูป 2.12

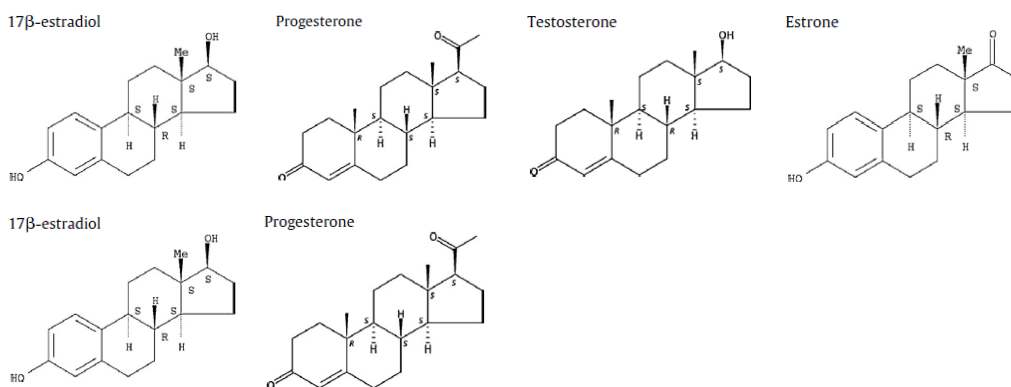


รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของ GO-SBA-15

(Li และคณะ, 2015)

2.10.3 ความเป็นพิษและการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT

(Sangster และคณะ, 2015) กล่าวถึงปัญหาที่เกิดจากผลของ สเตียรอยด์ฮอร์โมนที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากการกระจายตัวของฮอร์โมนในดินและตะกอน อย่างไรก็ตามขอบเขตการศึกษาถูกประเมินด้วยการกระจายตัวของฮอร์โมนจากอนุภาคของตะกอนขนาดต่างๆ ในการทดลองได้ศึกษาการดูดซับฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิดคือ 17-เบต้าเอสตราไดออล (17β -estradiol) เอสโตน (Estrone) โพรเจสเทอโรน (Progesterone) และ เทสโทสเตอโรน (Testosterone) ตามรูปที่ 2.13 โดยตะกอนที่ศึกษามี 2 กลุ่มคือดินร่วนเหนียวปนตะกอนทราย และดินตะกอนทราย แล้วทำการวัดค่าความสามารถในการดูดซับสเตียรอยด์ ค่าการกระจายตัว แล้ววัดไอโซเทอมเพื่อ Plot หาโมเดลในการดูดซับ สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์มากกว่าขนาดของอนุภาค ซึ่งปริมาณจะมีผลต่อการกระจายตัวของสารสเตียรอยด์ภายในตะกอน และจากผลการดูดซับสเตียรอยด์ ด้วยดินเหนียวและคอลลอยด์ในดินร่วนเหนียวปนตะกอนทราย



รูปที่ 2.13 แสดงสเตียรอยด์ฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิด

(Sangster และคณะ, 2015)

ประสิทธิภาพการดูดซับและการกระจายตัวในอนุภาคจะสูงขึ้นเมื่อขนาดของดินหรือตะกอนที่มีขนาดเล็กลง ขณะที่กลไกของสเตียรอยด์ฮอร์โมนกับตะกอนนั้นยังไม่แน่ชัด ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุไว้ว่าตะกอนเป็นตัวกระตุ้นกระบวนการทางชีวภาพต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอนุภาคของตะกอนที่มีความละเอียดจะเพิ่มการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสัตว์น้ำ และคาดว่าปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่ขนาดต่างๆ กับสเตียรอยด์ฮอร์โมนอาจเป็นสาเหตุมาจากการกระจายตัวของฮอร์โมนในอนุภาคที่มีขนาดเล็กถึง 93 เปอร์เซ็นต์ ของตะกอนที่ตรวจพบในฮอร์โมนที่ระดับความเข้มข้น 1 ng/L ขณะที่ตะกอนขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะแขวนลอยและเคลื่อนไปตามกระแสน้ำ สัตว์น้ำจึงมีโอกาสในการสัมผัสกับสเตียรอยด์ฮอร์โมนได้ง่าย โดยผ่านทางกร่อยและหายใจอนุภาคที่ไหลมาตามกระแสน้ำ (Homklin และคณะ, 2011) ศึกษา 17 แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรน (MT) ในตะกอนจากบ่อเลี้ยงปลาในช่วงที่มีการใส่ฮอร์โมนเปลี่ยนแปลงเพศโดยความเข้มข้นของ MT ในระยะแรก ตรวจพบที่ 3.6 µg/L และเมื่อจบกระบวนการแปลงเพศปลาหรือหลังจากใส่ฮอร์โมนตัดแปลงไปแล้วหนึ่งสัปดาห์พบ MT ในช่วง undetectable-0.02 µg/L หลังจากนั้นอีก 3 เดือนก็ยังสามารถตรวจพบ MT ได้ในตะกอนช่วงความเข้มข้น 2.8-2.9 ng/g (Dou และคณะ, 2008) ได้ศึกษาปริมาณ MT หลังการบำบัดด้วยการกรองชีวภาพพบว่าปริมาณ MT ที่ตกค้างหลังการบำบัดนั้นยังมีปริมาณที่สูงเพียงพอในการออกฤทธิ์ต่อสัตว์น้ำได้ถึง 81-100 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT ภายใต้ตัวรับอเล็กตรอนที่ต่างกันออกไปในตะกอนของบ่อเลี้ยงปลาด้วยวิธีการ เติมอากาศ ไนเตรตรีดักชัน เหล็ก(III)รีดักชัน ซัลเฟตรีดักชัน และกระบวนการสร้างมีเทน เพื่อศึกษาการสลายตัวและการออกฤทธิ์ของ MT และใช้ Testosterone equivalent (TEQ) ในการประเมินการคงอยู่และฤทธิ์ของแอนโดจินิกที่ตกค้างในน้ำ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 6 ชุด ดังตาราง 2.12

ตารางที่ 2.12 แสดงการออกแบบการทดลองเพื่อแสดงการคงอยู่และฤทธิ์ของแอนโตจินิกที่ตกค้าง
ในน้ำ

ชุดการทดลอง	ชนิดการทดลอง	ประเภทของ ตะกอน	สารตั้งต้น
T ₁	- ทดสอบการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ	ตะกอน	MT (10 mg/L)
T ₂	- ทดสอบการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ	ตะกอน	-
T ₃	- ทดสอบการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ	ตะกอน	Glucose (180 mg/L)
T ₄	- ชุดควบคุม	ตะกอนที่ผ่านการ ฆ่าเชื้อ	MT (10 mg/L)
T ₅	- ชุดควบคุมการเปลี่ยนรูปจาก กระบวนการไม่ใช่ทางชีวภาพ	-	MT (10 mg/L)
T ₆	- ชุดควบคุมการเปลี่ยนรูปจาก กระบวนการไม่ใช่ทางชีวภาพ	-	Glucose (180 mg/L)

(Homklin และคณะ, 2011)

ผลการยืนยันการออกฤทธิ์จากจุลชีพแสดงได้ดังนี้ การทดลองชุด T₃ พบว่าปริมาณของกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 4 วันจึงยืนยันได้ว่ามีการทำงานของจุลชีพในตะกอนดิน ใน T₅ พบว่าความเข้มข้นของ MT ไม่เปลี่ยนแปลงไป ใน T₆ ไม่มีการย่อยสลายของ Glucose ใน T₂ พบว่าตัวรับอิเล็กตรอนมีปริมาณลดลง

การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT พบว่าการทดลอง T₁ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT ในตะกอนโดยใช้ตัวรับอิเล็กตรอนที่ต่างกัน ในช่วง Lag phase (2-4 วัน) พบว่า MT มีการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วและยังเจอตัวรับอิเล็กตรอนทุกตัวยกเว้น Iron(III) reduction โดยหลังจากช่วง lag phase พบว่า MT เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ด้วย Iron(III) reduction แต่ไม่ตรวจพบการย่อยสลายของ MT ด้วย Nitrate-reduction นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT จะเกิดได้ดีในสภาวะเติมอากาศ ส่วนตัวรับอิเล็กตรอน methanogenic สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีวภาพของ MT ได้ดีเนื่องจากไม่พบ MT ที่ตกค้าง ซึ่งโดยปกติแล้ว MT ก็สามารถเมทาบอลิซึมได้ดีด้วยการออกฤทธิ์ทางแอนโตจินิกดังนั้นจึงพบว่าจะเกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมภายใต้กระบวนการ Nitrate(III)-reduction Iron(III)-reduction และ Methogenic นอกจากนี้การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพยังแสดงให้เห็นว่ามีการตกค้างของ MT ในตะกอนซึ่งควรกำจัดด้วยวิธี เติมอากาศ และ Sulfate-reduction เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด MT แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปของ MT ภายใต้ Nitrate(III)-reduction และผลกระทบต่อ MT จากการย่อยสลายด้วยแสงและการดูดซับ MT ในตะกอนในช่วงที่มีการเติมฮอร์โมน จึงยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางชีวภาพของ MT ได้อย่างแน่ชัด

ตารางที่ 2.13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อที่ศึกษา	รายชื่อผู้ทำการวิจัย	ข้อมูลจากงานวิจัยที่นำมาใช้
การกำจัด MT	(Cai และคณะ, 2014) (ฉนวนรี สุขเกษม, 2556) (Sangster และคณะ, 2015) (Hu และคณะ, 2011) (Rakić และคณะ, 2015) (Wojnarowicz และคณะ, 2014) (Nguyen-Huy และคณะ, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> - ผลจากการดูดซับของ GO, GAC และ MWCNTs ต่อการดูดซับ carbamazepine - ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซิลิกาต่อการดูดซับ MT - ความลึกของดินมีผลต่อการดูดซับและการคายซับของเทสโทสเตอโรน - ประสิทธิภาพของตัวกลางดูดซับ ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{MWNTs}$) ในการดูดซับ MT ที่สูงแม้ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำๆ - ผลของประจุบวกที่อยู่บนตัวดูดซับจับกับหมู่ฟังก์ชันบน PACs ทำให้สามารถจับได้ดีกับมลสารที่สามารถแสดงประจุลบออกมาและขั้วด้อยในเรื่อของ พีเอช และอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการดูดซับนั้นค่อนข้างแคบ - ผลการบำบัดด้วยวิธีทั่วไปพบว่าสามารถกำจัดฮอร์โมนและ EDCs ออกไปได้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณฮอร์โมนที่ตกค้างนั้นยังออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่อสัตว์น้ำ - 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดูดซับของ BPA <ol style="list-style-type: none"> 1. พลังงานสถิตย์ระหว่าง Hydroxyl group ของ BPA 2. พันธะ $\pi-\pi$

การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ	(Pourjavadi และคณะ, 2015) (Liu และคณะ, 2004) (Wang และคณะ, 2012) (Li และคณะ, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - การนำกราฟีนออกไซด์ต่อติดกับซูเปอร์พาราแมกเนติกนาโนพาทิเคิล - การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่เคลือบด้วยซิลิกา - ผลจากการเติมหมู่อะมิโนบนซิลิกาชนิดรูพรุน และการพิสูจน์หมู่อะมิโนที่ต่อติดบนซิลิกาชนิดรูพรุนด้วย FT-IR - ได้ศึกษาการสังเคราะห์ ซิลิกาชนิดรูพรุนต่อติดกราฟีนออกไซด์
ความเป็นพิษ และการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT	(Sangster และคณะ, 2015) (Homklin และคณะ, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพการดูดซับ MT จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์มากกว่าขนาดของอนุภาคซึ่งปริมาณของตะกอนจะมีผลต่อการกระจายตัวของสารสเตียรอยด์ - การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของ MT ขึ้นกับประเภทของตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ และจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ดีในสภาวะที่มีอากาศ

2.10.4. สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาจกข้างต้นนั้นได้มีการบำบัด 17-แอลฟาเมทิลเทสโทสเตอโรน (MT) ออกจากระบบด้วยวิธีต่างๆ อาทิเช่น การบำบัดด้วยวิธีทั่วไป (Conventional treatment) พบว่าปริมาณ MT ลดลงเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการออกซิเดชัน หรือการใช้ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ (Nitrate หรือ Sulfate reduction แบบใช้อากาศ และปฏิกิริยาเฟนตอน เป็นต้น) พบว่าเกิดการย่อยสลายของ MT เป็นจำนวนมาก แต่การศึกษาในเรื่องการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ MT เมื่อเกิดการ Redox นั้นยังมีไม่มากนัก ทำให้ไม่สามารถทราบได้แน่ชัดว่าจะกลายเป็นสารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษหรือไม่ จึงเป็นการดีที่จะกำจัด MT ออกด้วยการดูดซับเพราะราคาถูก ใช้พื้นที่น้อย แต่คงประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูง โดยงานก่อนหน้านี้นี้ได้ศึกษาการดูดซับ MT โดยใช้ซิลิกา ที่ดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันอะมิโน เมอร์แคปโต ออกทิล ฟีนิล พบว่า ซิลิกาที่ต่อติดหมู่อะมิโนมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำได้ดีที่สุดเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ และ อีออน-ขั้วคู่ ส่วนซิลิกาที่ต่อติดหมู่ฟีนิล สามารถดูดซับ MT ได้ดีที่สุดใน เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำ ($\pi-\pi$ bond) แต่เนื่องจากตัวกลางดูดซับที่ใช้มีขนาดอนุภาคเล็กมากจึงยากต่อการแยกออกจากระบบบำบัด งานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่ต่อติดกับกราฟีนออกไซด์โดยดัดแปลงหมู่

ฟังก์ชันอะมิโนที่พื้นผิวของตัวกลางดูดซับ สาเหตุที่เลือกกราฟีนออกไซด์ (GO) มาต่อดิซลิคาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (SP-SiO₂) เพราะ GO เป็นตัวกลางดูดซับที่ดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันได้ง่าย และมีพื้นที่ผิวมาก ส่วน SP ที่ใส่ลงไปนั้นเพื่อเพิ่มความเป็นแม่เหล็กให้กับตัวกลางดูดซับทำให้ง่ายต่อการแยกออกจากระบบ โดยการทดลองจะทดสอบความจำเพาะต่อการดูดซับในน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (สารอินทรีย์ธรรมชาติปนอยู่กับ MT ที่ความเข้มข้นต่ำๆ) โดยคาดว่าจะสามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำต่อการดูดซับ MT



บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 3.1.1.1 Duran 2 L
- 3.1.1.2 Magnetic stirrer
- 3.1.1.3 Three-necked flask
- 3.1.1.4 Round bottom flask
- 3.1.1.5 กระจาดกรอง Nylon 0.45 μm
- 3.1.1.6 Syringe filter
- 3.1.1.7 Three-necked flask
- 3.1.1.8 บีกเกอร์ขนาด 25,50,100,250,1000 ml
- 3.1.1.9 Round bottom flask
- 3.1.1.10 ปิเปต 5,10 ml
- 3.1.1.11 กระจาดกรอง Nylon 0.45 μm
- 3.1.1.12 Syringe filter
- 3.1.1.13 บุษเซอร์ขนาด 105 mm
- 3.1.1.14 ยางรองบุษเซอร์
- 3.1.1.15 ขวดกรอง

3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์

- 3.1.2.1 Low-angle powder X-ray diffraction (XRD)
- 3.1.2.2 Fourier Transform Infrared spectrometer (FT-IR)
- 3.1.2.3 Surface area analyzer
- 3.1.2.4 pH meter
- 3.1.2.5 spectrophotometer
- 3.1.2.6 High performance liquid chromatography (HPLC)
- 3.1.2.7 Column C8, C18, NH_2
- 3.1.2.8 ชุด SPE
- 3.1.2.9 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.2.10 เครื่องเขย่า
- 3.1.2.11 ปัมสุญญากาศ

- 3.1.2.12 Scanning electron microscope (SEM)
- 3.1.2.13 Bet surface area analyzer (BET)
- 3.1.2.14 ตู้ดูดควัน
- 3.1.2.15 ตู้อบ
- 3.1.2.16 Thermometer
- 3.1.2.17 ชุดกรองสูญญากาศ

3.1.3 สารเคมี

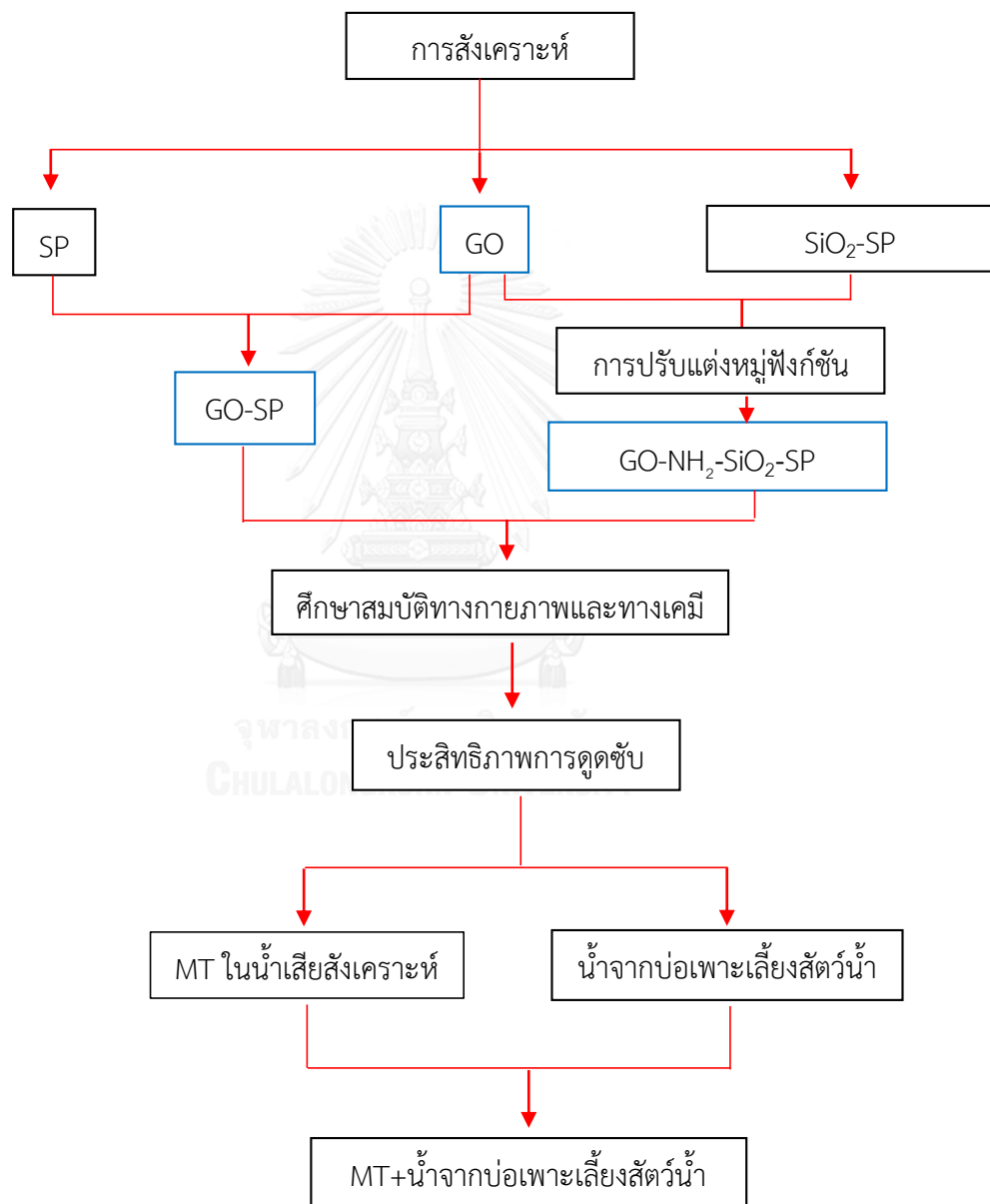
- 3.1.3.1 H₂SO₄
- 3.1.3.2 Graphite
- 3.1.3.3 5% HCl
- 3.1.3.4 3-aminopropyltrimethoxysilane (AEAPS)
- 3.1.3.5 N-N⁰-dicyclohexylcarbodiimide (DCC)
- 3.1.3.6 Dimethylformamide (DMF)
- 3.1.3.7 Toluene
- 3.1.3.8 Ethyl acetate
- 3.1.3.9 Acetonitrile
- 3.1.3.10 Tertaethylorthosilicate (TEOS)
- 3.1.3.11 30% H₂O₂
- 3.1.3.12 KMnO₄
- 3.1.3.13 30% ammonia solution
- 3.1.3.14 FeCl₃.6H₂O
- 3.1.3.15 FeCl₂.4H₂O
- 3.1.3.16 Ethanol
- 3.1.3.17 NaOH
- 3.1.3.18 DEG
- 3.1.3.19 Ethyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)
- 3.1.3.20 Tetraacethyl ortrosilicate (TEOS) 10%
- 3.1.3.21 Glacial acetic acid
- 3.1.3.22 methanol

3.2 การทดลอง

งานวิจัยครั้งนี้ดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับทั้งหมด 6 ชนิด (GO, SP, GO-SP, SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) จากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลาง

ดูดซับแต่ละชนิด และทดสอบข้อมูลการดูดซับโดยใช้สารละลายสังเคราะห์ MT เชิงเดี่ยวและสารละลายเชิงผสมที่มี MT และสารอินทรีย์ตามธรรมชาติจากบ่อเลี้ยงปลา

การทดลองเป็นแบบทีละเท (Batch) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำจากแหล่งเพาะเลี้ยงปลา แล้วทำการทดสอบแบบเชิงเดี่ยว (MT) และแบบผสม (MT+ DOC) โดยตัวแปรควบคุมมีดังต่อไปนี้ ไอออนในสารละลายสังเคราะห์ อุณหภูมิ และพีเอช โดยขั้นตอนและกระบวนการดังกล่าวแสดงให้เห็นจากแผนผังการทดลองดังต่อไปนี้ (รูปที่ 3.1) ซึ่งการทดลองแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนงานวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ

3.2.1.1 สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO)

(Xu และคณะ, 2008)

1. เทกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 120 มิลลิลิตร ในลงบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร แล้วนำไปวางในภาคน้ำแข็งที่ตั้งบนเครื่องกวนเพื่อให้อุณหภูมิเป็น 0 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมผงกราฟไฟต์ลงไป 2 กรัม แล้วจึงเติม KMnO_4 15 กรัม ในสภาวะที่กวนตลอดเวลาสารละลายที่ได้จะเปลี่ยนเป็นสีเขียว แล้วจึงนำไปตั้งบน Water bath เพื่อคุมอุณหภูมิไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส พร้อมกวนต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. ย้ายขวดที่เกิดปฏิกิริยามาตั้งบนภาคน้ำแข็ง แล้วจึงเติมน้ำกลั่น 230 มิลลิลิตร ลงไปในขวดอย่างช้าๆ ต้องระวังไม่ให้อุณหภูมิเกิน 20 องศาเซลเซียส สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง และมีควันเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะไม่มีการกวน เพราะจะทำให้ควบคุมอุณหภูมิได้ยาก เมื่อเสร็จสิ้นการเติมน้ำกลั่นค่อยทำการกวนต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมน้ำกลั่น 700 ml แล้วกวนต่อไปอีก 5 นาที

3. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ($30\% \text{H}_2\text{O}_2$) 20 มิลลิลิตร จะเห็นว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองพร้อมเกิดฟองที่ผิวหน้าของสารละลาย นำสารละลายที่ได้ใส่ลงในขวดสังเคราะห์สารแล้วนำไปปั่นแยก (Centrifuge) ที่ 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วล้างต่อด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ($5\% \text{HCL}$) อีก 3 ครั้งครั้งละ 300 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดไอออนของโลหะหนัก จากนั้นล้างต่อด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ครั้งครั้งละ 300 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดกรดที่ตกค้าง เมื่อปั่นเสร็จแล้วจะทิ้งส่วนที่เป็นสารละลายแต่เก็บตะกอนไว้ ทำการชูดออกจากภาชนะไปยังถ้วยกระเบื้องแล้วอบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืนจะได้ผลึกของ GO แล้วนำไปเก็บในหลอดเก็บตัวอย่างขนาด 50 ml ปิดฝาและพันด้วยพาราฟิน เพื่อป้องกันการออกซิไดซ์กับอากาศ

3.2.1.2 การสังเคราะห์ อนุภาคแม่เหล็ก (magnetic nano particle, SP)

(Liu และคณะ, 2004)

ในการสังเคราะห์ SP นั้นจะใช้วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) โดยจะเป็นการตกตะกอนร่วมอย่างสมบูรณ์ของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ในสภาวะเบสจนเกิดเป็น magnetite (Fe_3O_4) ในอัตราส่วนโมล 1:2 ตามลำดับ ภายใต้ nitrogen atmosphere เพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ตั้งขั้นตอนนี้

1. ชั่ง $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.86 กรัม แล้วตามด้วย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2.36 กรัม เพราะ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Fe^{3+}) จะถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่ายจึงควรชั่งที่หลัง โดยชั่งในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

2. นำไปกวนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาทีจากนั้นนำบิกเกอร์ไปแช่ในน้ำร้อน เพื่อทำให้อุณหภูมิในบิกเกอร์เพิ่มขึ้นเป็น 85 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5 มิลลิลิตรจะเห็นได้ว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากโลหะไอออนทำปฏิกิริยากับเบสแก่จึงเกิดเป็นตะกอนของโลหะ

3. ทำการแยกตะกอนโลหะ (Fe_3O_4) ที่ได้ด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวรแล้วทิ้งส่วนที่เป็นของเหลวออก ส่วนตะกอนที่เหลือนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น 4-5 ครั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือตะกอนเหล็ก (Fe_3O_4) น้ำหนัก 1 กรัม ผลิตภัณฑ์ที่ได้ควรนำไปใช้ต่อทันที เพราะถ้าเก็บไว้จะง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์โดยอากาศทำให้เกิดสนิมขึ้น

3.2.1.3 กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) ด้วยวิธี

Co-precipitation (Pourjavadi และคณะ, 2015)

1. เตรียมสารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตรลงในขวดก้นกลมชนิดต่อสามทางขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เตรียมกราฟีน 0.1 กรัมละลายในน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตรลงบิกเกอร์ A ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เตรียม $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.6 กรัม และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.6 กรัม ลงในบิกเกอร์ B ขนาด 25 มิลลิลิตร
4. นำสารผสมในบิกเกอร์ B เทลงในบิกเกอร์ A โดยชะสารละลายเหล็กที่ค้างในบิกเกอร์ B ด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (บิกเกอร์ C)
5. นำสารละลายจากบิกเกอร์ C เทลงในขวดก้นกลมและกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่ 25 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายสีดำ ชะสารละลายที่ติดค้างในบิกเกอร์ C ด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จะเห็นได้ว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีดำ
6. นำสารละลายสีดำที่ได้มาอบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นทิ้งให้เย็น ที่อุณหภูมิห้อง แล้วแยกตะกอนที่ได้ด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวร
7. นำมาล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง และตามด้วยเอทานอลอีก 3 ครั้ง แล้วจึงนำมาทำให้แห้งที่ 50 องศาเซลเซียส ในเดซิเคเตอร์

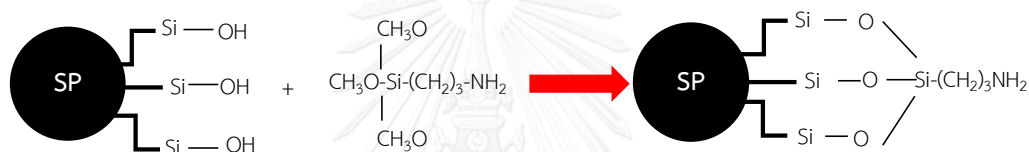
3.2.1.4 การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา (SiO_2 -SP)

(ณัฐพร เอี่ยมสะอาด, 2557)

1. นำ SP มา 0.25 กรัม ชะด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วละลายใน 2-propanol 670 มิลลิลิตร ในขวด Duran ขนาด 2 ลิตร
2. นำไปกวนเป็นเวลา 10 นาที แล้วเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 58.33 มิลลิลิตร กับ TEOS 8.33 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนต่ออีกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. เทน้ำกลั่นลงไปขวดสังเคราะห์ 6 ครั้งครั้งละ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกรองแล้วชะด้วยเอทานอล แล้วจึงนำไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. เก็บผลึกของ SP-SiO_2 ใส่ขวดเก็บสารขนาด 50 มิลลิลิตรในสภาวะสุญญากาศ

3.2.1.5 การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและทำการดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา (magnetic silica amino-silane particles) ($\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) (Liu และคณะ, 2004)

1. ละลายแมกเนติกซิลิกา ($\text{SiO}_2\text{-SP}$) 2 กรัม ในสารละลายเมทานอล (เมทานอล 250 มิลลิลิตร น้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร และ 3-aminopropyltrimethoxysilane (AEAPS) 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกวนเป็นเวลา 30 นาที (บีกเกอร์ A)
2. เติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ A แล้วจึงเทสารไปยังขวดก้นกลมชนิดต่อสามทางขนาด 500 มิลลิลิตร คงอุณหภูมิไว้ที่ 85-90 องศาเซลเซียสพร้อมกวนอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก้อนกลมขนาดนาโน
3. ล้างตัวกลางดูดซับที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ตามด้วยเมทานอล 2-3 ครั้ง จากนั้นทำให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 แสดงหมู่อะมิโนที่ติดบนซิลิกา

3.2.1.6 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและทำการดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา ($\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) (Li และคณะ, 2015)

1. ละลาย GO 0.04 กรัม ด้วยไดเมทิลฟอร์มามิโด (Dimethylformamide, DMF) 100 มิลลิลิตร พร้อมกวนเป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายสีเหลืองน้ำตาลมีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียว ในบีกเกอร์ A ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ตั้งบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
2. เติม $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ 0.2 กรัม และ N-N'-dicyclohexylcarbodiimide (DCC) 0.4 กรัม ลงในบีกเกอร์ A พร้อมกวนตลอดเวลา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ทำการแยกตะกอนออกจากสารละลายด้วยด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวรจากนั้น ล้างด้วย DMF ตามด้วย ethanol อย่างละ 3 ครั้งครั้งละ 50 มิลลิลิตร
4. นำตะกอนที่ได้นำมาอบในสภาวะสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วเก็บผลึกของแข็งที่ได้ด้วยขวดเก็บสารตัวอย่างขนาด 50 มิลลิลิตร ในกล่องที่มีซิลิกาดูดความชื้น เพื่อป้องกันตัวกลางดูดซับออกซิไดซ์กับอากาศ

3.2.2 ศึกษาทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับและมลสารที่ดูดซับ

3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

โดยนำสารตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับโดยใช้ Low angle Powder X-ray diffraction (XRD)

3.2.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนเคลือบอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกบนซิลิกาที่มีการเติมหมู่อะมิโน และกราฟีนที่ต่อติดหมู่อะมิโน โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR)

3.2.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว

เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรและขนาดของรูพรุน ด้วยวิธี nitrogen adsorption คำนวณโดยใช้สมการของ Brunner-Elmer-Teller (BET) เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ

3.2.2.4 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวด้วยการวิเคราะห์โดยการไทเทรตกรด-เบส

การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับด้วยเทคนิคการไทเทรตกรด-เบส เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) 0.025 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.1 โมลาร์ ในน้ำ DI 18.2 Ω จากนั้นเตรียมสารละลายผสมที่มีปริมาณตัวกลางดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยทำให้สารละลายแต่ละขวดมีค่าพีเอชต่างกันด้วยการเติม HCL หรือ NaOH 0.05 0.1 0.5 และ 1 มิลลิตร ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิตร และควบคุมความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยสารละลาย NaCl จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปเขย่า 200 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง แล้วนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการ 3.1

$$\text{Surface charge } (C m^{-2}) = \frac{\{[HCl] - [NaOH] - [H^+] + [OH^-]\} \times 96,500}{M \times S_{BET}} \quad 3.1$$

เมื่อ [HCl]	= ความเข้มข้นของ HCL ที่เติม (mol/L)
[NaOH]	= ความเข้มข้นของ NaOH ที่เติม (mol/L)
[H ⁺]	= ความเข้มข้นของโปรตอนไอออน (mol/L) คำนวณได้จาก pH = -log[H ⁺]
[OH ⁻]	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (mol/L)

	คำนวณได้จาก $pOH = -\log[OH^-]$ และ $pOH = 14 - pH$
96500	= ค่าคงที่ฟาราเดย์ (C/mol)
M	= น้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (g/L)
S_{BET}	= พื้นที่จำเพาะของตัวกลางดูดซับ (m^2/g)

3.2.3 การสังเคราะห์ และตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์

ความเข้มข้นของ MT ในสารละลายเชิงเดี่ยวที่ความเข้มข้นสูงระดับมิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดย UV spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 245 นาโนเมตร

สำหรับความเข้มข้น MT ในสารละลายผสมและ หรือที่ระดับความเข้มข้นต่ำระดับไมโครกรัมต่อลิตรสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องมือ HPLC-DAD โดยตัวอย่างถูกเพิ่มความเข้มข้นและทำความสะอาดสารรบกวนด้วยเทคนิคการ pre-concentration ด้วย solid phase extraction (SPE) แล้วจึงนำไปวัดความเข้มข้นด้วย HPLC-DAD

3.2.3.1 เทคนิคการ Pre-concentration ด้วย Solid phase extraction (SPE)

SPE เป็นเทคนิคการแยกสารปนเปื้อนออกโดยให้สารที่ต้องการติดอยู่กับตัวดูดซับใน cartridge จากนั้นเติมตัวทำละลายเพื่อดึงเอาสารที่สนใจที่เกาะกับตัวดูดซับออก เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยขั้นตอนการใช้ SPE มีขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้

1. Condition

เป็นการเตรียม ตัวดูดซับที่อยู่ในหลอด (Cartridge, C-18 SPE) ให้อยู่ในสถานะที่พร้อมใช้งานโดยการใส่เอทิลอะซิเตต 5 มิลลิลิตร, อะซิโตนไนไตรล์ 5 มิลลิลิตร และน้ำ 5 มิลลิลิตร ลงไปใน SPE (เพื่อให้ตัวดูดซับใน SPE อิ่มไปด้วยตัวทำละลาย) จากนั้นทำการปล่อยตัวทำละลายทิ้งโดยให้ตัวทำละลายอยู่เหนือจากตัวดูดซับ ประมาณ 0.5 เซนติเมตร

2. Load

เป็นการใส่ตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ลงไปเพื่อให้จับกับตัวดูดซับ โดยในขั้นนี้ต้อง load ให้แห้ง (เพื่อกำจัดตัวทำละลายจากกระบวนการก่อนหน้านี้และที่มีอยู่ในตัวอย่าง)

3. Elution

เป็นการดึงสารที่เราสนใจที่เกาะกับตัวดูดซับออก เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยใช้ตัวทำละลาย เมทานอล ในการชะสารที่สนใจวิเคราะห์ออกมา นำสารตัวอย่างที่ผ่านการ SPE ไปวิเคราะห์ต่อด้วย HPLC-UV

3.2.3.2 การวิเคราะห์ด้วย high performance liquid chromatography (HPLC-DAD)

1. นำตัวอย่างที่ได้มากรองด้วย Syringe filter ชนิด Nylon ขนาดรูพรุน $0.22 \mu m$

2. นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นตาม Condition ดังต่อไปนี้ Column C8, C18 (150 mm X 4.6 mm X 5 μ m) Reverse phase, Temperature 40 ± 0.5 °C Retention time 15.251 min Limited of detection (LOD) 50 μ g/L, Sample injection volume 30 μ l โดย Mobile phase ที่ใช้ คือ Acetonitrile/water

At 0 min \longrightarrow Acetonitrile 20%

At 19 min \longrightarrow Acetonitrile 96%

At 20 min \longrightarrow Acetonitrile 20%

And continuous in 10 min

3.2.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ MT

จะศึกษาบนตัวกลางดูดซับ ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ GO SP GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP ที่ความเข้มข้น MT 100 ไมโครกรัมต่อลิตรหรือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ในสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และที่ ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร ในปริมาณตัวกลางดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร ณ อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อวินาที ในเวลา 0-24 ชั่วโมง จากนั้นนำค่าที่ได้มา พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นในการดูดซับ(มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อเวลา (นาที) โดยมีวิธีการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. เตรียมน้ำตัวอย่าง MT ที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ลงใน ขวดรูปชมพู่ จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับ GO ที่ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร ลงไปในน้ำตัวอย่าง

2. ควบคุมพีเอชของน้ำตัวอย่างด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ให้เท่ากับ 7 และ ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

3. นำขวดตัวอย่างไปเขย่า และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บตัวอย่าง สารที่เวลา 0 1 2 5 10 15 30 60 120 และ 240 นาที จากนั้นเก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง

4. นำสารละลายที่ได้จากการกรองด้วย nylon filter 0.22 μ m และวิเคราะห์ MT ด้วย HPLC-UV

5. ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น SP GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP

ตารางที่ 3.1 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของ MT

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในงานวิจัย
ตัวแปรต้น	- เวลา - ชนิดของสารดูดซับ	- 0 1 2 5 10 15 30 60 120 และ 240 นาที จากนั้นเก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง - GO SP GO-SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของ MT ที่คงอยู่	-
ตัวแปรควบคุม	- พีเอช - อุณหภูมิ - Ionic strength - ปริมาณสารดูดซับ - ปริมาณและความ เข้มข้นของ MT - จำนวนรอบในการ ปั่นกววน	ควบคุมให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 25±2 องศาเซลเซียส 0.01 โมลาร์ 0.5 กรัมต่อลิตร 15 มิลลิกรัมต่อลิตร 200 รอบต่อนาที

3.2.5 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของ MT

การศึกษาไอโซเทอม เพื่อหาแนวโน้มการดูดซับว่ามีลักษณะการดูดซับ เป็นแบบกายภาพหรือทางเคมี โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้สมการเชิงเส้นของ แลงเมียร์ ฟรุนดลิช และ โกเบิลคอร์ดริเจน ในการอธิบายผลการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างน้ำที่มี MT ที่ความเข้มข้น 0 5 10 15 20 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่

2. จากนั้นใส่ตัวกลางดูดซับที่ความเข้มข้น GO 0.05 กรัมต่อลิตร ลงไปในน้ำตัวอย่างที่มี MT ณ ความเข้มข้นต่างๆ

3. ควบคุม pH และ ionic strength ให้เท่ากับ 7 และ ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

4. นำขวดตัวอย่างไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง จนเข้าสู่สภาวะสมดุลตามเวลาที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์

5. แล้วทำการกรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วยกระดาษกรอง nylon filter 0.22 μ m

6. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ MT ด้วย HPLC-UV

7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP

ตารางที่ 3.2 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสมมูลการดูดซับของ MT

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในงานวิจัย
ตัวแปรต้น	- ความเข้มข้นของ MT - ชนิดของตัวกลางดูดซับ	- 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร - GO SP GO-SP SiO ₂ -SP NH ₂ -SiO ₂ -SP และ GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของ MT ที่คงอยู่	-
ตัวแปรควบคุม	- พีเอช - อุณหภูมิ - Ionic strength - ปริมาณสารดูดซับ - ปริมาณและความเข้มข้นของ MT - จำนวนรอบในการปั่นกรอง - เวลา	- ควบคุมให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ - 25±2 องศาเซลเซียส - 0.01 โมลาร์ - 0.5 กรัมต่อลิตร - 50 มิลลิตร/ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร - 200 รอบต่อนาที - 7 ชั่วโมง

3.2.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา

ในการทดลองนี้จะดำเนินการทดลองคล้ายกับการทดลองที่ 4 และ 5 แต่จะเปลี่ยนมลสารที่จะทำการดูดซับ (MT) เป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา (DOC)

1. เตรียมตัวอย่างน้ำที่มี DOC ความเข้มข้น 0 2 5 และ 10 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ในขวดรูปชมพู่

2. ชั่งตัวกลางดูดซับ GO ที่ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร ใส่ลงไปในน้ำตัวอย่างที่มี DOC ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

3. ควบคุมพีเอชของน้ำตัวอย่างด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ให้เท่ากับ 7 และ ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

4. นำขวดตัวอย่างไปเขย่า และควบคุมอุณหภูมิที่ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หรือตามเวลาที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับระยะเวลาเข้าสู่สมดุล)

5. แล้วทำการกรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วยกระดาษกรอง nylon filter 0.22 µm

6. นำสารละลายที่ได้ไปกรอง และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง HPLC ที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร หรือวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TOC analyzer

7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP

3.2.7 การดูดซับแบบผสมในกรณีมี MT อยู่ร่วมกับ DOC ในน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา

ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาความสามารถในการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับโดยทำการวัดไอโซเทอมการดูดซับที่มีสารอินทรีย์จากบ่อเลี้ยงปลาผสมอยู่

1. เตรียมตัวอย่างน้ำที่มี MT ความเข้มข้น 0 5 10 15 20 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร
2. ชั่งตัวกลางดูดซับ GO จำนวน 0.05 กรัมต่อลิตร ใส่ลงไปลงในน้ำตัวอย่างที่มี MT ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ
3. ควบคุมพีเอชของน้ำตัวอย่างด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ให้เท่ากับ 7 และ Ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
4. นำขวดตัวอย่างไปเขย่า และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่สภาวะสมดุล
5. แล้วทำการกรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วยกระดาษกรอง nylon filter 0.22 μm
6. นำสารละลายที่ได้ไปกรองไปวิเคราะห์ MT และ DOC ด้วย HPLC-UV
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP GO-SP

3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ด้วยแม่เหล็ก

ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวร

1. ชั่งตัวกลางดูดซับ 0.1 กรัมมาผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 30 นาที
2. ทำการแยกด้วยแผ่นแม่เหล็กถาวร
3. วัดความขุ่นของน้ำด้านบนบีกเกอร์ด้วย NTU
4. คำนวณหาประสิทธิภาพการแยกโดยแม่เหล็ก โดยอาศัยค่าความขุ่นที่วัดได้

$$\frac{(NTU_{\text{เริ่มต้น}} - NTU_{\text{ที่ 1 ชั่วโมง}})100}{NTU_{\text{เริ่มต้น}}} = \text{ประสิทธิภาพในการกำจัด (100\%)}$$

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยได้ศึกษาการดูดซับ 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรนบนตัวกลางดูดซับ กราฟีนออกไซด์ (GO) อนุภาคแมกเนติก (SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา ($\text{SiO}_2\text{-SP}$) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา และต่อติดหมู่อะมิโน ($\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) และกราฟีนออกไซด์ที่อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและต่อติดหมู่อะมิโน ($\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) โดยวิธีการตกผลึกร่วม (Co-precipitation) จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ ประสิทธิภาพการดูดซับ และประสิทธิภาพการแยกด้วยแม่เหล็ก

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

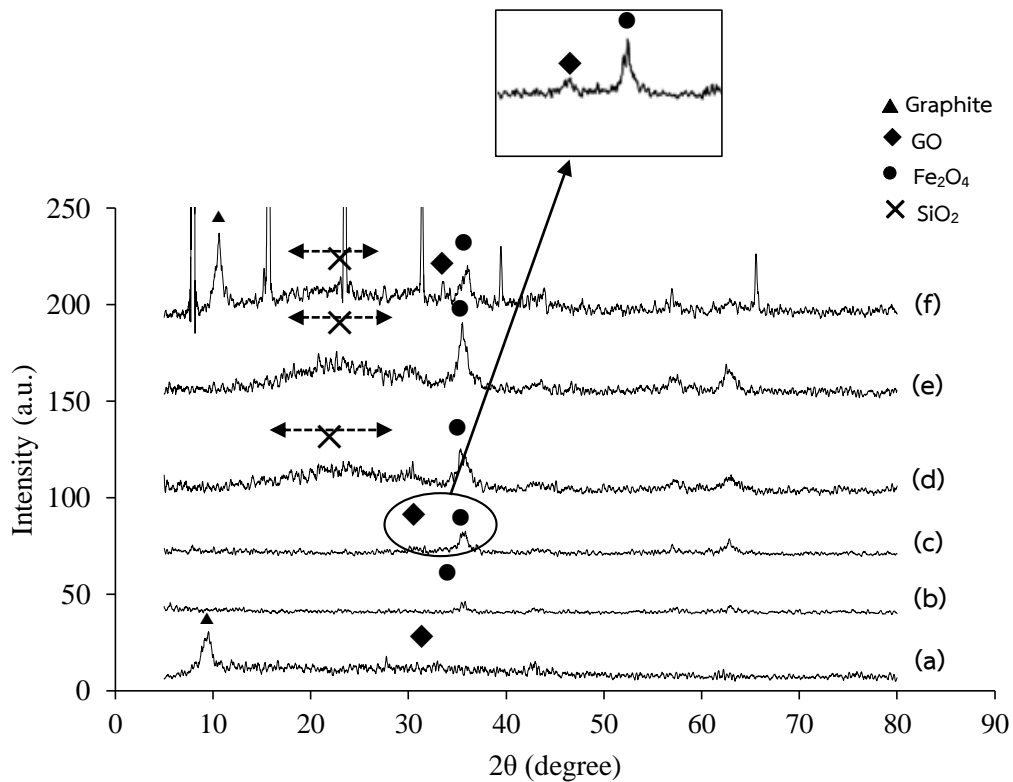
งานวิจัยนี้ ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ 6 ชนิด ได้แก่ กราฟีนออกไซด์ (GO) อนุภาคแมกเนติก (SP) กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา ($\text{SiO}_2\text{-SP}$) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา และต่อติดหมู่อะมิโน ($\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) และกราฟีนออกไซด์ที่อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและต่อติดหมู่อะมิโน ($\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) โดยวิธีการตกผลึกร่วม (Co-precipitation) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ-เคมีดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับ

จากผลการวิเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ทั้ง 6 ชนิด (GO, SP, GO-SP, $\text{SiO}_2\text{-SP}$, $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$, GO- $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$) โดย X-Ray Powder Diffraction (XRD) โดยวิเคราะห์ที่ $2\theta = 5.00^\circ$ ถึง 80.00° ด้วย step 0.02° ที่ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) โดยโครงสร้างผลึกของสารที่สังเคราะห์นั้นแสดงดังรูปที่ 4.1 ผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้ พบว่าโครงสร้างผลึกของกราฟไฟต์มีสเปกตรัมที่เด่นชัดที่ $2\theta = 9.54^\circ$ ($d \sim 0.94$ nm) ทำให้พบ d-spacing ของชั้นกราฟไฟต์ที่ 0.94 nm (Dikin และคณะ, 2007) สำหรับ SP พบสเปกตรัมที่เด่นชัดที่ $2\theta = 35.6^\circ$ จึงสามารถระบุได้ว่าเป็นผลึกของ SP ส่วน GO-SP พบสเปกตรัมที่ $2\theta = 30.5^\circ$ และ 35.94° ตามลำดับ จึงสามารถยืนยันได้ว่าการผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์กับซูบเปอร์พาราแมกเนติก (Fe_3O_4) (Shen และคณะ, 2010) สาเหตุที่ทำให้เส้นสเปกตรัมของกราฟีนนั้นขึ้นไม่ชัดเจนเนื่องจากการบดบังของผลึก Fe_3O_4 ในชั้นของกราฟีน ดังรูปที่ 4.4 (C1-3)

ผลโครงสร้างผลึกของ $\text{SiO}_2\text{-SP}$ และ $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ พบว่าหมู่อะมิโนไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของ $\text{SiO}_2\text{-SP}$ (Poursaberi และคณะ, 2012) โดยจะปรากฏสเปกตรัม 2θ ในช่วง $20^\circ\text{-}25^\circ$ และโครงสร้างผลึกของ GO- $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ พบค่า $2\theta = 30.5^\circ$ 25.94° และ amorphous ที่ $20^\circ\text{-}25^\circ$ จึง

ยืนยันได้ว่าตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นเกิดการเชื่อมต่อของ กราฟีน เหล็ก และซิลิกา สาเหตุที่สเปกตรัมของ กราฟีนไม่ชัดเจนนั้น เกิดจากการบดบังของผลึก Fe_3O_4 โดยยืนยันจากผลของ SEM ดังรูปที่ 4.4 (F1-3) สำหรับแถบสเปกตรัมของ graphite ที่พบในตัวกลางดูดซับ GO และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ แต่ไม่พบใน GO-SP เนื่องจากชุดของตัวกลางดูดซับ GO ที่สังเคราะห์ขึ้นในแต่ครั้งนั้นมีความบริสุทธิ์ของกราฟีนออกไซด์ที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a) GO (b) SP (c) GO-SP (d) $\text{SiO}_2\text{-SP}$ (e) $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ (f) $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$

4.1.2 ปริมาณกราฟีนออกไซด์

สัดส่วนของกราฟีนออกไซด์ที่ติดบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถตรวจวัดได้ โดยสัดส่วนที่หายไปจากการเผาไหม้ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยคำนวณในรูปแบบของร้อยละ ตัวประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยจะทำการเทียบ GO ที่มีร้อยละของกราฟีนออกไซด์เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวกลางดูดซับ GO-SP จะนำไปเผาที่ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อเทียบน้ำหนักก่อนการเผาเพื่อหาร้อยละของกราฟีนออกไซด์ที่หายไป ส่วน $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ ทำการชั่งตัวกลางดูดซับ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ และ $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ ก่อนนำไปเผาแล้วจึงนำมาลบน้ำหนักหลังการเผาจะได้ร้อยละของกราฟีนออกไซด์ที่หายไปเพื่อนำไปใช้ในคงอยู่ของกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับ จากผลการทดลองที่ได้รับสามารถกล่าวได้ว่ากราฟีนออกไซด์ที่ติดหมู่อะมิโน จะมีปริมาณของกราฟีนออกไซด์มากกว่ากราฟีน

ออกไซด์ที่ไม่ต่อติดหมู่อะมิโน เนื่องจาก ไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) ของหมู่อะมิโนจะจับไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) ของหมู่ฟังก์ชันที่ขบ กราฟีนออกไซด์ด้วยพันธะที่แข็งแรงช่วยให้มีปริมาณกราฟีนออกไซด์สูงกว่าในกรณีที่ไม่ต่อติดหมู่อะมิโน

ตารางที่ 4.1 ปริมาณร้อยละของกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

ตัวกลางดูดซับสังเคราะห์	% SP	% SiO ₂ -SP	% NH ₂	% GO
GO	-	-	-	100
SP	100	-	-	-
GO-SP	90.5	-	-	9.5
GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	-	68	7	25

4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน

จากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) แสดงค่าดังตาราง 4.2 แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างสัณฐานของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Dreyer และคณะ, 2010) ดังนั้นข้อมูลขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนที่ได้จากการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนนั้นจึงไม่ควรนำมาพิจารณาแต่อย่างไรก็ตามรูพรุนที่วิเคราะห์ได้อาจเกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของ SP หรือช่องว่างระหว่างแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ไม่ใช่รูพรุนในโครงสร้างของอนุภาค ส่วนค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนั้นเป็นค่าที่สามารถคำนวณได้จากไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจน จากการต่อดูดกราฟีนออกไซด์พบว่าพื้นที่ผิวโดยรวมของ GO-SP ลดลงไป จึงสามารถสรุปได้ว่าการต่อดูดอนุภาคแมกเนติกจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดซับลดลง ดังตารางที่ 4.2 ตามสัดส่วนของ GO และ SP ดังตารางที่ 4.1

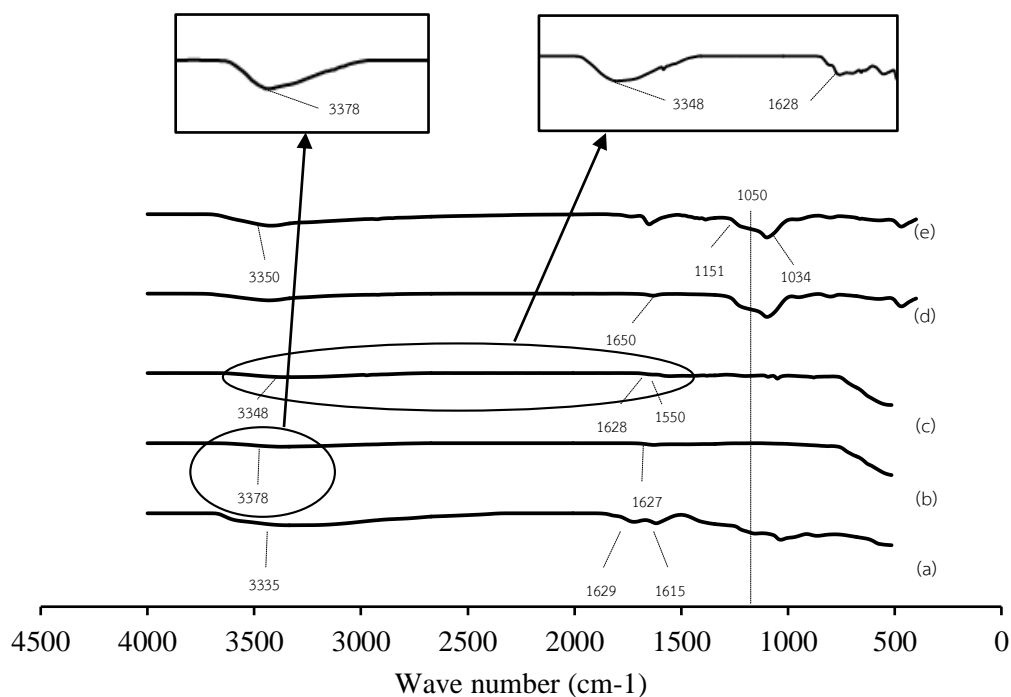
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

ตัวกลางดูดซับ	ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
GO	105.60	1.66	319.99
SP	44.46	0.52	232.10
GO-SP	42.46	0.44	208.01

4.1.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ (GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO- NH₂-SiO₂-SP) ด้วยเครื่อง Fourier Infrared Spectrometer (FTIR) จากการสั่น ยืด และ

งของสารอินทรีย์เนื่องจากการดูดกลืนรังสี IR ของพันธะภายในโมเลกุลในช่วงความถี่ต่างๆ แล้ว แสดงผลออกมาเป็นเส้นสเปกตรัมที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) GO (b) SP (c) GO-SP (d) $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ และ (e) $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$

จากการวิเคราะห์ผล FT-IR ของตัวกลางดูดซับ GO SP GO-SP $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ พบว่าเส้นสเปกตรัมของ GO แสดงหมู่ฟังก์ชันที่ 3335 cm^{-1} (O-H stretching) 1629 cm^{-1} (C=O stretching) 1615 cm^{-1} (skeletal vibration from unoxidized graphitic domains) 1151 cm^{-1} (C-OH stretching) และที่ 1034 cm^{-1} (C-O stretching) (Eun-Young Choi และคณะ, 2010). เส้นสเปกตรัมของ Fe_3O_4 พบแถบการดูดซับในช่วง $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ และที่ 1627 cm^{-1} (Gupta และคณะ, 2004) เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายน้ำมาล้อมรอบที่พื้นผิวของ Fe_3O_4 ส่วน GO-SP แสดงแถบสเปกตรัมที่ 3348 cm^{-1} (O-H stretching) และ 1050 cm^{-1} (C-OH stretching) จากผลที่สอดคล้องกันของ FT-IR และ XRD จึงสามารถยืนยันได้ว่าการต่อติดของ GO และ SP

สเปกตรัมของ $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ (Moore และคณะ, 2003), (Shokri และคณะ, 2009), (González และคณะ, 2012) ปรากฏสเปกตรัมที่ 1650 cm^{-1} (N-H bending) และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ พบสเปกตรัมที่ 3450 (O-H stretching) 1151 cm^{-1} (C-OH stretching) และที่

1034 cm^{-1} (C-O stretching) จึงสามารถยืนยันได้ว่ากราฟอินฟราเรดเกิดการฟอร์มตัวกับซิลิกาที่ต่อติดหมู่อะมิโน

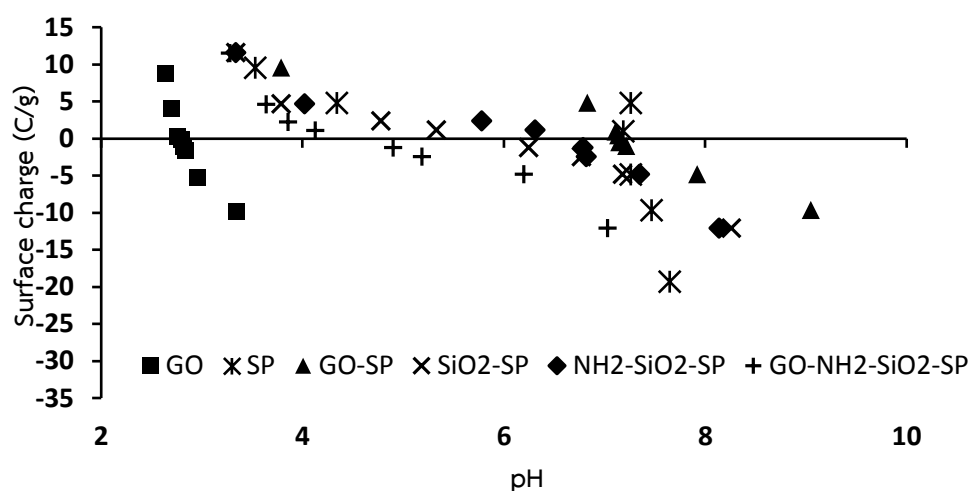
4.1.5 การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

ประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับสามารถดูได้จาก pH_{zpc} ได้ค่าดังตารางที่ 4.3 เมื่อค่า pH มีค่ามากกว่า pH_{zpc} จะทำให้ผิวของประจุตัวกลางเป็นลบเนื่องจากการสูญเสียโปรตอน เมื่อ pH มีค่าน้อยกว่า pH_{zpc} ประจุบนพื้นผิวของตัวกลางจะเป็นบวกเนื่องจากการรับโปรตอน

ค่าพีเอช (pH) ที่ zero point charge (pH_{zpc}) ของแต่ละตัวกลางดูดซับ (GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) ถูกกำหนดด้วยวิธีไทเทรตกรดเบส ซึ่งค่า pH_{zpc} ของแต่ละตัวกลางดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า pH_{zpc} ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

ตัวกลางดูดซับ	pH_{zpc}
GO	2.84
SP	7.65
GO-SP	7.18
SiO ₂ -SP	5.65
NH ₂ -SiO ₂ -SP	6.79
GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	4.52

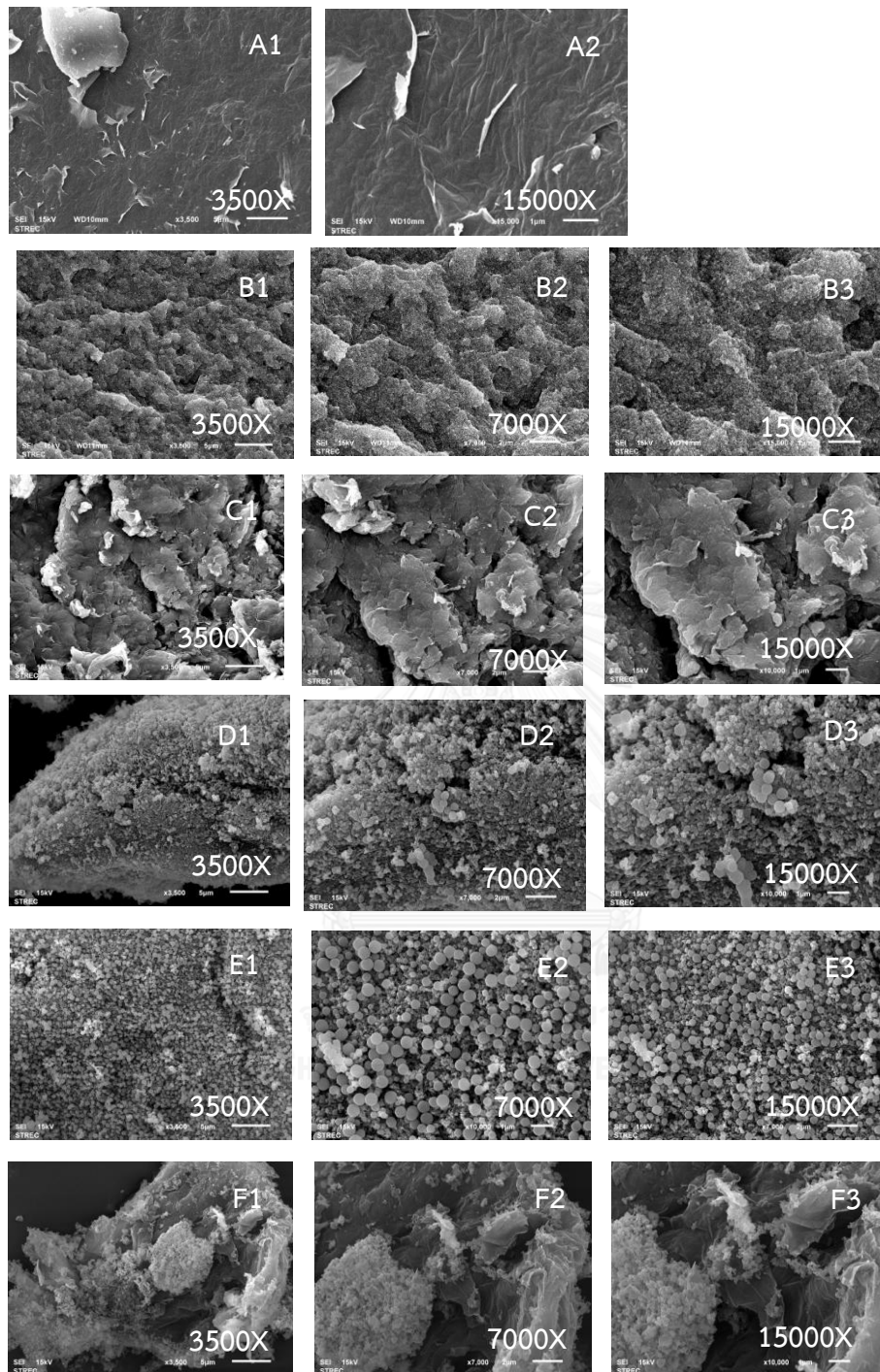


รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ (ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.1.6 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

จากการวิจัย GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP ที่กำลังขยาย 3,500 7,500 10,000 และ 15,000 เท่า แสดงดังรูป 4.4 พบว่าพื้นผิวของ GO (Dreyer และคณะ, 2010) เป็นแผ่นเรียบ และมีลักษณะเป็นชั้นๆ เนื่องจากการหลุดลอกของแผ่นกราฟีนออกไซด์ สำหรับ SP มีลักษณะเป็นก้อนกระจุกตัวอย่างหนาแน่นและมีพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ และเมื่อทำการต่อติดกราฟีนออกไซด์ด้วยอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแยกออกจากสารละลายด้วยสมบัติความเป็นแม่เหล็ก พบว่าตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะคล้ายก้อน Fe₃O₄ ของ SP มาปกคลุมทั่วทั้งพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์

รูปที่ 4.4 (D1-3) แสดงลักษณะสัณฐานของ SiO₂-SP ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็กคล้ายไขปลาเนื่องจากอนุภาค SP ถูกเคลือบด้วย SiO₂-SP แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ NH₂-SiO₂-SP (E1-3) ซึ่งเกิดจากการต่อติดหมู่เอมีนบนพื้นผิวของซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เพื่อใช้สำหรับเพิ่มความสามารถในการดูดซับจำเพาะกับมลสาร MT โดยลดการเกาะเป็นกลุ่มก้อนของ DOC พบว่ามีลักษณะเป็นก้อนกลมๆ คล้ายไขปลากระจายอยู่ทั่วเช่นกัน แต่อนุภาคของ NH₂-SiO₂-SP มีลักษณะสมบูรณ์สวยงามกว่า SiO₂-SP แสดงว่าปฏิกิริยา co-condensation ของ NH₂-SiO₂-SP เกิดขึ้นดีกว่าของ SiO₂-SP และในกรณีของ GO-NH₂-SiO₂-SP เป็นการต่อติดกราฟีนออกไซด์ที่ทำการดัดแปลงหมู่เอมีนบนพื้นผิวกับซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกเพื่อช่วยให้พันธะที่เชื่อมระหว่างกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคแมกเนติกมีความแข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกาะกลุ่มของ DOC ซึ่งจะเห็นเป็นแผ่นเรียบของกราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับ NH₂-SiO₂-SP มีลักษณะเป็นก้อนกลมคล้ายไขปลาบนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์

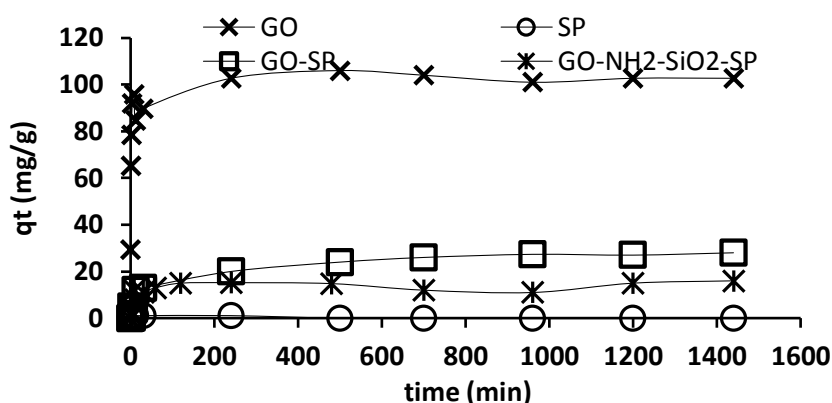


รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (A1-2) GO (B1-3) SP (C1-3) GO-SP (D1-3) SiO_2 -SP (E1-3) NH_2 - SiO_2 -SP และ (F1-3) GO- NH_2 - SiO_2 -SP

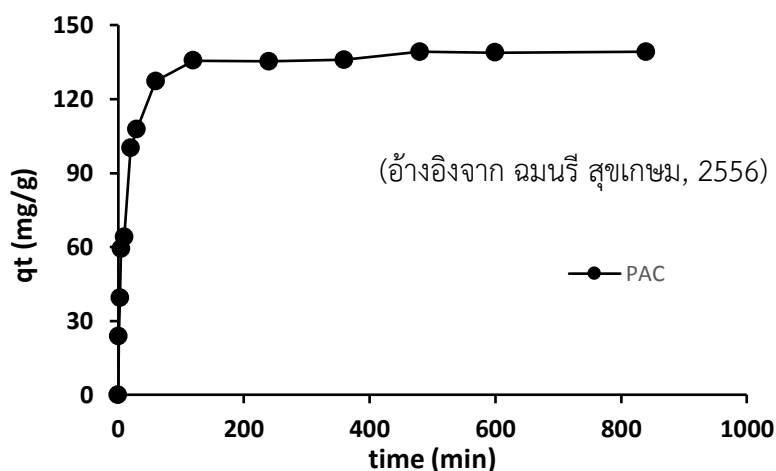
4.2 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ

4.2.1 ผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ

ในการศึกษาผลจากเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับนั้นจะเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมวลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ต่อเวลา (นาที) ดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของ MT บนตัวกลางดูดซับ SP ไม่ลดลงเนื่องจาก SP ไม่ดูดซับ MT นอกจากนี้พบว่าตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP จะมีความสามารถในการกำจัด MT มากขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น (Moradi และ คณะ, 2015) โดยเฉพาะในช่วง 10 นาทีแรกจะเกิดการดูดซับ อย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ผิวของกราฟีนออกไซด์ที่เป็นวงอะโรเมติกมีปริมาณเพียงพอต่อการดูดซับส่งผลให้ MT ถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิดจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเข้าสู่ความเข้มข้นสมดุลภายใน 7 ชั่วโมง โดยกำหนดความเข้มข้นของ MT เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP เท่ากับ 68.47 18.67 และ 10.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุที่ GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP มีความสามารถในการดูดซับ MT น้อยกว่า GO ทั้งนี้เนื่องจากมีอนุภาคของ Fe₃O₄ จำนวนมากปกคลุมพื้นผิวและหมู่ฟังก์ชันของ GO ดังรูป 4.4 (C) และ 4.4 (F) ตามลำดับ ส่งผลให้ GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP มีพื้นที่ผิวของกราฟีนออกไซด์ หมู่ฟังก์ชันเอมีนและหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนขอบของกราฟีนออกไซด์มีปริมาณพื้นที่ผิวลดลง จึงนำไปสู่ค่าการดูดซับบนตัวกลางดูดซับลดลง แต่เมื่อนำมาเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกับ PAC (Powder activated carbon) จากรูปที่ 4.6 พบว่าประสิทธิภาพของ PAC สูงกว่าตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของ PAC ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย และมีพื้นที่ผิวมากจึงสามารถดูด MT ได้ดี (ฉมนรี สุขเกษม, 2556)



รูปที่ 4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (GO SP GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) โดยควบคุม pH ที่ 25 องศาเซลเซียส, pH เท่ากับ 7 GO 0.05 g/L และ ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นสูง (ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25 องศาเซลเซียส, pH เท่ากับ 7 และ ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร)
(ฉมนรี สุขเกษม, 2556)

4.2.2 การศึกษาโมเดลทางจลนพลศาสตร์

นำข้อมูลของตัวกลางทั้ง 4 ชนิด มาสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาใดๆ ต่อเวลาสัมพันธ์กับสมการเชิงเส้น pseudo 1 order และ pseudo 2 order พบว่า SP ไม่สามารถเหมาะสมกับสมการใดๆ เนื่องจาก SP ไม่สามารถดูดซับ MT สำหรับ GO และ GO-NH₂-SiO₂-SP ตรงกับสมการ pseudo 2 order ซึ่งค่า k จากสมการ pseudo 2 order สามารถบอกถึงอัตราเร็วในการดูดซับและการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ดังนั้นค่า k ยิ่งมากจะทำให้อัตราเร็วและการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับเร็วกว่าค่า k ที่น้อยกว่า (ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 2558) แสดงดังตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ยังสามารถบอกถึงปริมาณตัวกลางดูดซับที่ต้องใช้ต่อปริมาณ MT ที่ถูกดูดซับต่อเวลา ซึ่งในการทดลองจะควบคุมปริมาณตัวกลางดูดซับดังนั้นถ้าค่า k น้อยจะสามารถดูดซับ MT ได้ดีกว่าตัวกลางดูดซับที่มีค่า k สูงกว่า จึงสรุปได้ว่า GO จะมีอัตราเร็วในการดูดซับและการเข้าสู่สมดุลการดูดซับช้ากว่า GO-NH₂-SiO₂-SP แต่มีปริมาณ MT ที่ถูกดูดซับต่อเวลาสูงกว่าจึงชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO สูงกว่าบนตัวกลางดูดซับ GO-NH₂-SiO₂-SP

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ของการดูดซับ MT บนตัวกลางที่มีความเข้มข้นสูง (MT 15 ppm)

ตัวกลางดูดซับ	$q_{e,exp}$ (mg g ⁻¹)	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน	
		K_1 (g mg ⁻¹ h ⁻¹)	R^2
GO	102.7	4.2156	0.2139
SP	2	0.0227	0.033
GO-SP	28	0.2134	0.951
GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	16	25.748	0.6493

ตัวกลางดูดซับ	$q_{e,exp}$ (mg g ⁻¹)	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน	
		K_1 (g mg ⁻¹ h ⁻¹)	R^2
GO	102.7	13.5444	0.9986
SP	2	0.24575	0.0356
GO-SP	28	12.7551	0.6833
GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP	16	195.313	0.9637

4.2.3 การแพร่ภายใน

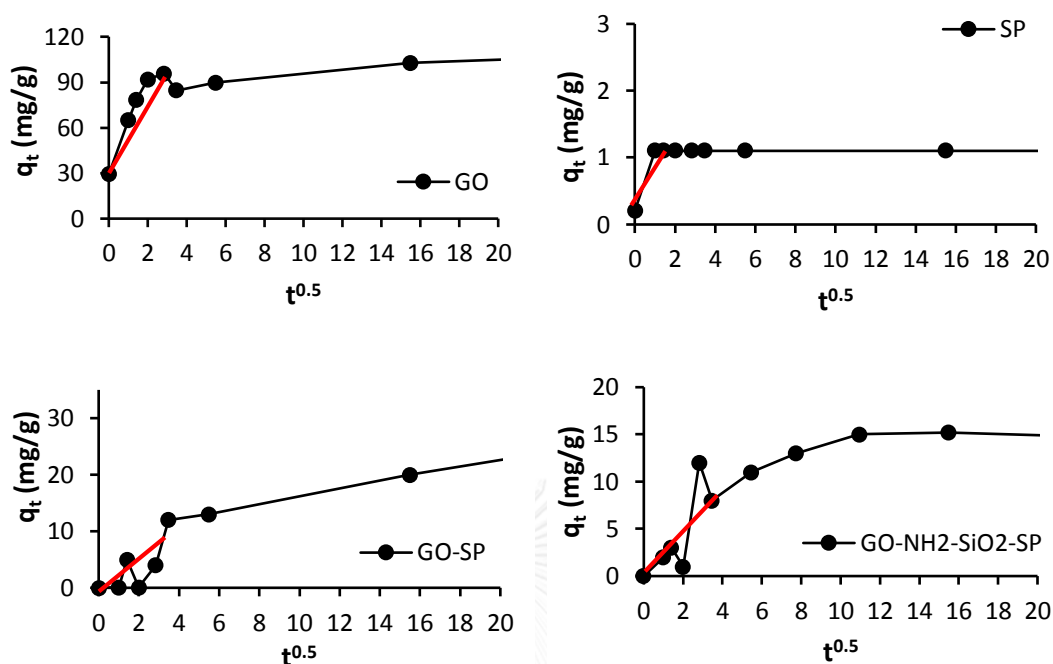
จากผลการทดลอง การดูดซับที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการแพร่ภายในหรือกลไกที่มลสารแทรกตัวเข้าสู่รูพรุนและช่องว่างของตัวกลางดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ แต่เนื่องจากตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ไม่มีความเป็นรูพรุนจึงทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นมาจากปรากฏการณ์การแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มซึ่งสามารถยืนยันความเป็นไปได้ที่เกิดการแพร่ภายใน จากความชันของเส้นตรงหรือค่าคงที่การแพร่ภายใน (K) (Ramesha และคณะ, 2011) ดังสมการที่ 4.1 โดยทำการพลอตสมการเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ MT ที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ ต่อ $t^{0.5}$ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ดังสมการต่อไปนี้

$$q = Kt^{0.5} \quad (4.1)$$

กำหนดให้ q คือปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

$t^{0.5}$ คือรากที่สองของเวลาสัมผัส (min^{0.5})

ผลอัตราการแพร่ภายในของตัวกลางดูดซับ GO มีค่าเท่ากับ 9.1094 mg/g min^{0.5} SP มีค่าเท่ากับ 0.4666 mg/g min^{0.5} GO-SP มีค่าเท่ากับ 2.6766 mg/g min^{0.5} และ GO-NH₂-SiO₂-SP มีค่าเท่ากับ 1.4068 mg/g min^{0.5} ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์การแพร่ภายในของ MT บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ GO SP GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP (ความเข้มข้นเริ่มต้น 15 ppm น้ำหนักตัวกลางดูดซับ 0.01 กรัม เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง pH 7 GO 0.05 g/L และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ 17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน (MT) (ผลจากความเข้มข้น)

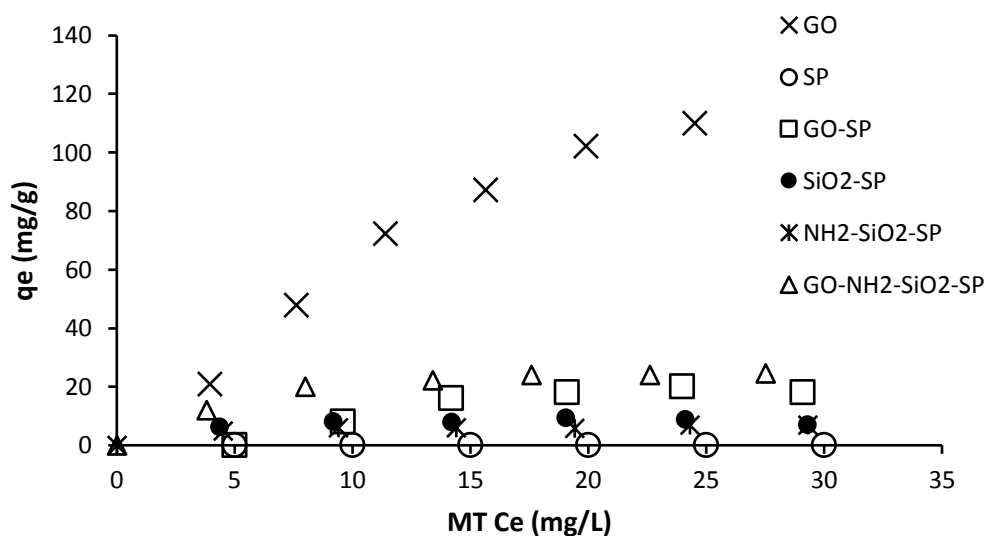
ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด โดยควบคุม pH ของฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่พีเอช 7 ทำให้ MT มีสภาพเป็นกลางเนื่องจาก pKa ของ MT เท่ากับ 10 พบว่าประสิทธิภาพที่ได้เป็นดังต่อไปนี้ GO > GO-NH₂-SiO₂-SP > GO-SP > SiO₂-SP > NH₂-SiO₂-SP > SP ดังรูปที่ 4.8 โดย GO จะมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเนื่องจากมีพื้นผิวที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารในกลุ่ม aromatic ส่วนความสามารถในการดูดซับของ GO-NH₂-SiO₂-SP และ GO-SP ต่ำกว่า GO เนื่องจากผลของการบดบังจากอนุภาคแมกเนติกบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

จากผลการทดลองพบว่า GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP เหมาะสมต่อสมการ Langmuir isotherm model (Gao และคณะ, 2012) ซึ่งแสดงจากพารามิเตอร์ และค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 ทำให้ทราบว่าปรากฏการณ์การดูดซับของตัวกลางดูดซับข้างต้นมีแนวโน้มเป็นแบบชั้นเดียวโดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังต่อไปนี้ 1) การดูดซับเกิดที่บริเวณพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ 2) พื้นที่ที่เกิดการดูดซับจะดูดซับกับมลสารเป้าหมายเท่านั้น 3) พลังงานที่ใช้ในการดูดซับเท่ากันทุกตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ และ 4) สมมติฐานให้ไม่มีแรงกระทำกันระหว่างมลสารที่อยู่บน

ตัวกลางดูดซับ และบริเวณใกล้เคียง (Xu และคณะ, 2012) (ปฏิภาณ ปัญญาพกุล, 2558) โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.9822 0.9116 และ 0.9708 ตามลำดับ ในขณะที่ผลการคำนวณสำหรับ SP และ $\text{SiO}_2\text{-SP}$ และ $\text{NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ ไม่สอดคล้องกับสมการทั้งสองประเภท (Freundlich และ Langmuir isotherm)

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยเทียบกับปริมาณ GO ที่ต่อติดบนตัวกลางดูดซับที่น้ำหนักหนึ่งหน่วยจากรูปที่ 4.9 ผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้ $\text{GO-SP} > \text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP} > \text{GO}$ เมื่อนำเทียบกับค่า pH_{zpc} พบว่าค่า zero point charge ของ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ เท่ากับ 4.515 ส่วนหมู่เอมีนที่อยู่บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับทำให้พื้นผิวแสดงความเป็นบวก จึงทำให้เกิดการผลักรันระหว่างไอออนขั้วคู่ของ MT และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ และอาจเกิดการแยงจับกันของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายน้ำ ทำให้พื้นที่สัมผัสของตัวกลางดูดซับลดลงสำหรับ GO-SP นั้นมีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 7.18 จึงมีสภาพเป็นกลางทำให้ดูดซับกับมลสารได้ดีกว่า สาเหตุที่ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO-SP และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ สูงกว่า GO อาจเนื่องจากการตรึงพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ GO-SP และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ ด้วยอนุภาคแมกเนติก และหมู่เอมีนโนทำให้กราฟไม่เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อ GO มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะเกิดการรวมกลุ่มได้ง่ายจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดซับลดลง

การเปรียบเทียบปริมาณกราฟีนบนตัวกลางดูดซับ GO-SP และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ ทำได้โดยนำตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิดมาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าปริมาณกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับ GO-SP และ $\text{GO-NH}_2\text{-SiO}_2\text{-SP}$ เท่ากับ 9.5 และ 25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากนั้นนำไปเทียบเป็นปริมาณกราฟีน 100 เปอร์เซ็นต์โดยเทียบระหว่างความสัมพันธ์ของมลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับที่ใช้ต่อความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล แสดงดังรูปที่ 4.9

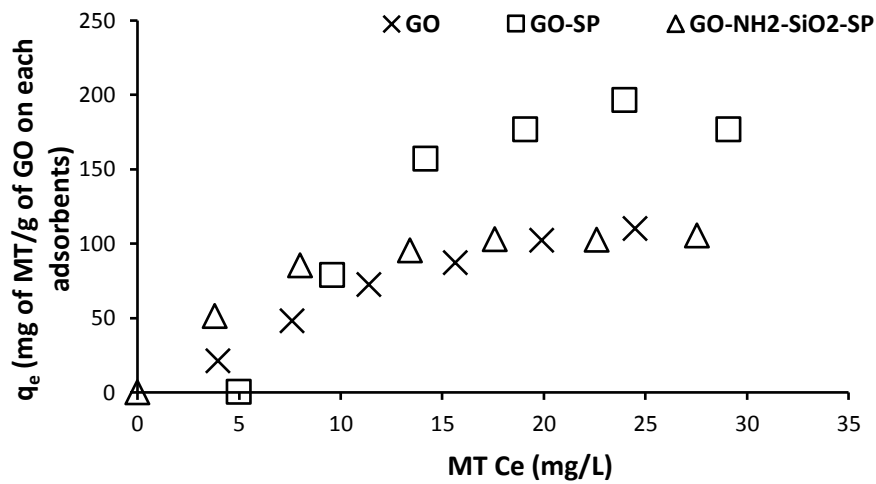


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) โดยเทียบจากความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการดูดซับต่อความเข้มข้นคงเหลือ ควบคุม pH เท่ากับ 7 ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

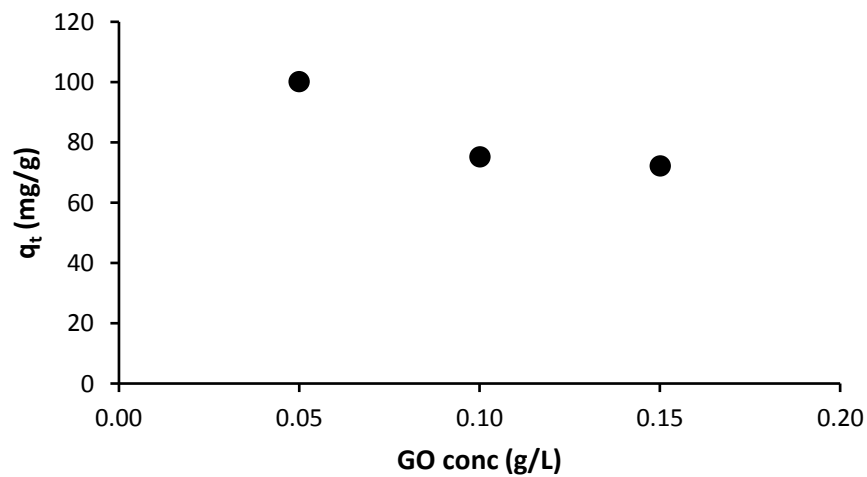
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการดูดซับจาก Langmuir และ Freundlich isotherm model

Langmuir	GO	SP	GO-SP	SiO ₂ -SP	NH ₂ -SiO ₂ -SP	GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
q (mg/g)	110	0.4	20	9.45	7	24.7
B (L/mg)	0.2224	0.6575	0.0411	0.5680	0.5355	0.3677
R ²	0.9822	0.0342	0.9116	0.4777	0.7956	0.9708
MPSD	0.3853	-	0.9076	-	-	0.0878

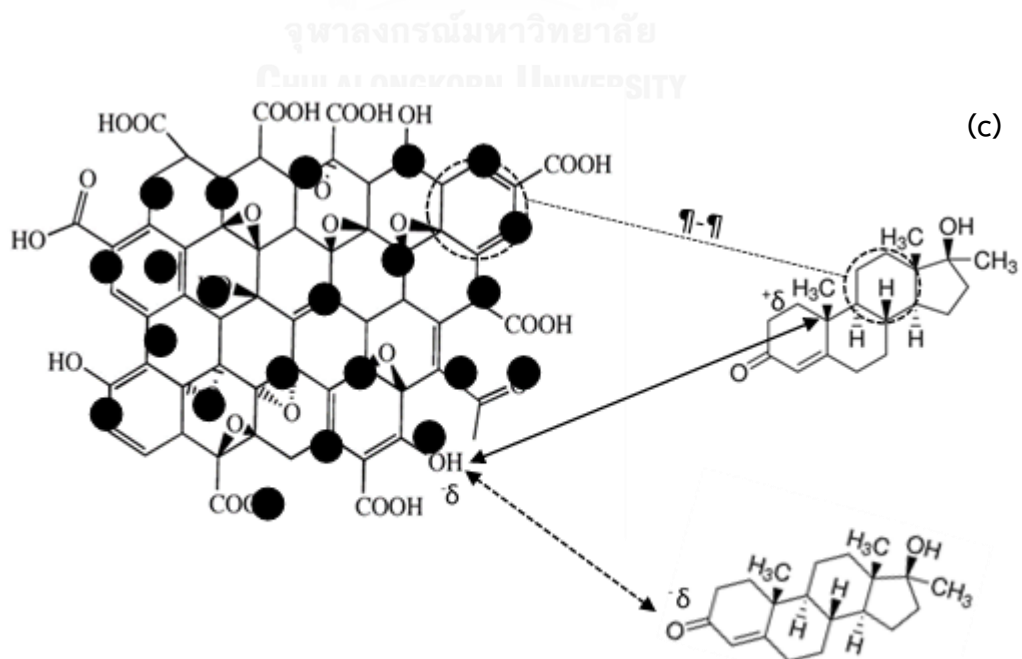
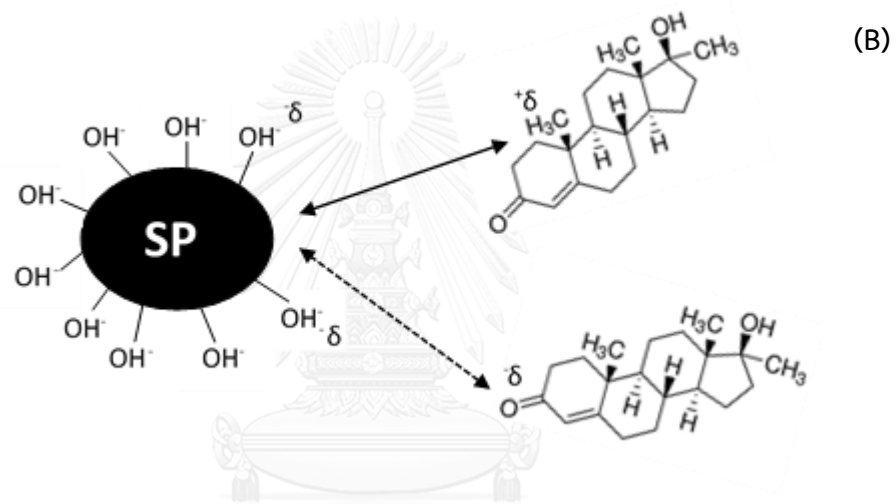
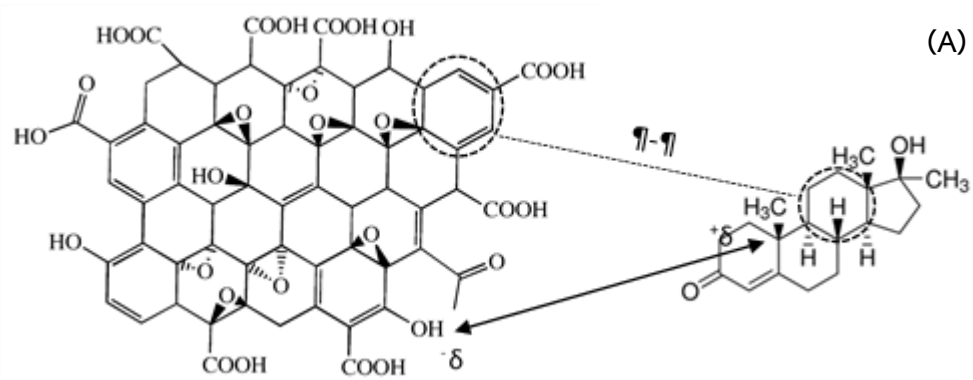
Freundlich	GO	SP	GO-SP	SiO ₂ -SP	NH ₂ -SiO ₂ -SP	GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
K _F (L/mg)	84.9180	0.0236	0.0083	58.2505	23.4963	407.568
n	1.1010	10.8932	0.6135	8.8028	6.0753	5.2798
R ²	0.9651	0.0289	0.8354	0.2805	0.8151	0.9399
MPSD	0.1019	-	0.6299	-	-	0.0301

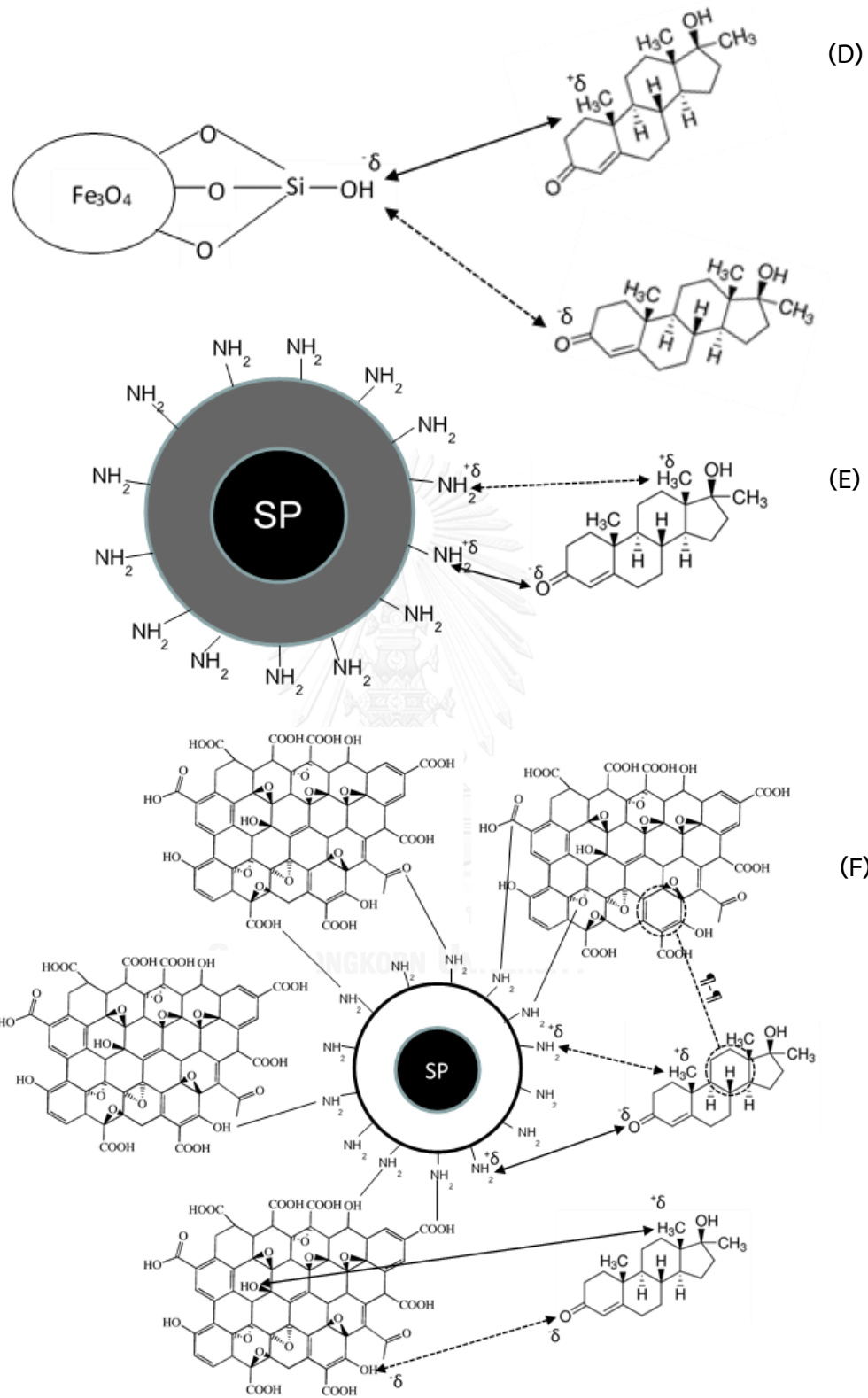


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด (GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) โดยเทียบปริมาณกราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับกับน้ำหนักรายหนึ่งหน่วย ควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ GO ที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.15 g/L ควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

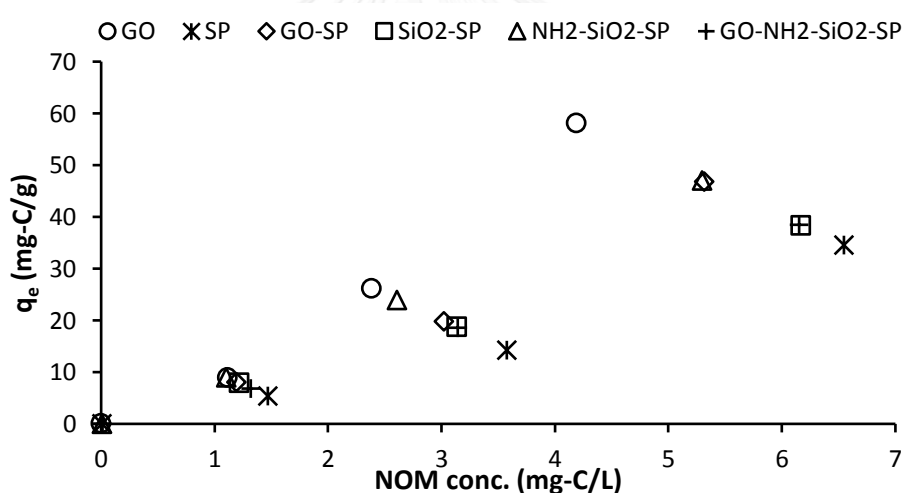




รูปที่ 4.11 แบบจำลองการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด (A) GO (B) SP (C) GO-SP
(D) SiO₂-SP (E) NH₂-SiO₂-SP และ (F) GO-NH₂-SiO₂-SP

4.4 การศึกษากระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) ที่ความเข้มข้นของ DOC 0 2.5 และ 10 mg-C/L โดยควบคุม pH เท่ากับ 7 ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสประสิทธิภาพการดูดซับแสดงดัง รูปที่ 4.12 เป็นดังต่อไปนี้ (GO > NH₂-SiO₂-SP > GO-SP > GO-NH₂-SiO₂-SP > SP > SiO₂-SP) พบว่า GO มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (DOC) มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน สามารถละลายน้ำประกอบด้วยพอลิอะโรมาติกคาร์บอน เป็นวงอะโรมาติก หลายวงต่อกัน และมีฟิโนลิกเป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งคอนจูเกตกับพันธะคูในโมเลกุล (Apul และคณะ, 2013) ทำให้สามารถดูดซับได้ดีกับตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นวงอะโรมาติก ด้วยแรง π - π interaction ส่วนตัวดูดซับที่มี SP เป็นองค์ประกอบจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเนื่องจากเกิดการบดบังพื้นที่ผิวจำเพาะของกราฟีนออกไซด์ด้วยอนุภาคของ Fe₃O₄

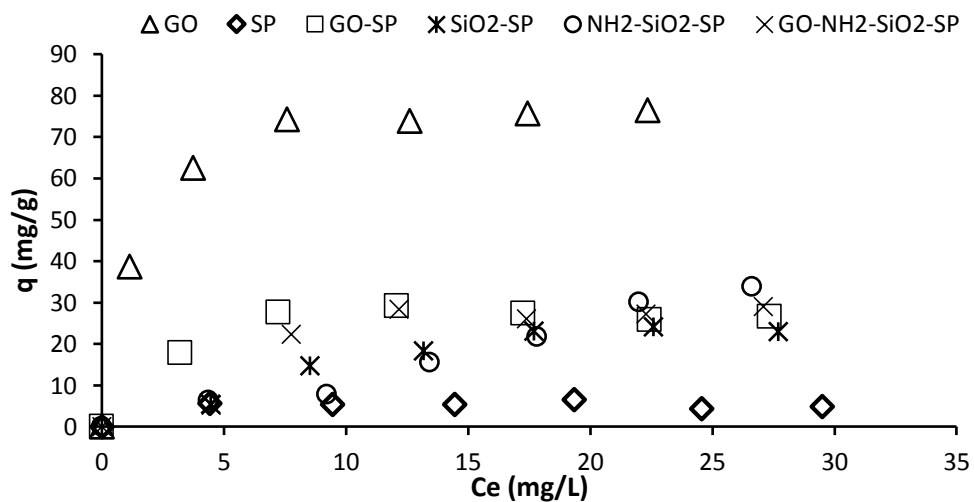


รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ บนตัวกลางดูดซับ (GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.5 การศึกษากระบวนการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์

จากผลการคัดเลือกเฉพาะในการดูดซับ MT ที่มี DOC เป็นองค์ประกอบ โดยควบคุมความเข้มข้นของ MT ที่ 5 10 15 20 25 และ 30 ppm และ ความเข้มข้นของ DOC คงที่ที่ 2 mg-C/L ที่ pH 7 ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.13 พบว่า GO มีความสามารถในการดูดซับ MT สูงสุดเนื่องจากพื้นผิวที่เป็นอะโรมาติก ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง MT และ DOC ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Apul และคณะ, 2013) และ (Chen และคณะ,

2015) ได้บ่งชี้ให้เห็นว่า MT สามารถยึดติดบนผิวของ DOC ได้เป็นอย่างดีเนื่องด้วยสมบัติไฟฟ้าสถิตย์ แรงออสซิลเลชัน และ π - π interaction สำหรับ GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP นั้นจะมีประสิทธิภาพการดูดซับแบบจำเพาะต่อ MT ลดลงเนื่องด้วยผลจากการบดบังของ Fe₃O₄ ที่ชั้นของกราฟีนออกไซด์ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผล XRD ดังรูป 4.4 (C1-3) และ (F1-3) ส่วน SiO₂-SP และ NH₂-SiO₂-SP จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่ำเนื่องจากอาศัยเพียงแรงไฟฟ้าสถิตย์และออสซิลเลชัน ในการดูดซับ สำหรับ SP พบว่าไม่สามารถดูดซับ MT ได้เลย โดยอธิบายได้จากผล FT-IR ดังรูปที่ 4.2 โดยคาดว่า ไฮดรอกไซด์ไอออนจากสารละลายน้ำมาล้อมรอบพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ SP ทำให้เกิดแรงผลักของประจุระหว่างโมเลกุลของ MT กับประจุบนตัวกลางดูดซับ



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์บนตัวกลางดูดซับ (GO SP GO-SP SiO₂-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของ MT หรือ DOC เชิงเดี่ยว และ MT ในกรณีที่มี DOC พบว่าความสามารถในการดูดซับ MT แบบผสมสูงกว่าเชิงเดี่ยวในทุกตัวกลางดูดซับ (ยกเว้น GO-NH₂-SiO₂-SP) ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับ DOC เชิงเดียวนั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกันในทุกตัวกลางดูดซับเนื่องจากโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันที่ซับซ้อนของ DOC ยกเว้น GO ที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่เด่นชัด เนื่องจากผลของพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีลักษณะเป็นวงอะโรมาติก ซึ่งอาศัยการจับกันด้วยพันธะ π - π โดยจะอธิบายพฤติกรรมของตัวกลางดูดซับแต่ละตัวโดยเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.14 ได้ดังต่อไปนี้

GO จากรูป 4.14 (A) พบว่าความสามารถในการดูดซับ DOC เชิงเดียวนั้นเด่นชัดมากเนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่เป็นวงอะโรมาติก เกิดการ de-localized electron ทำให้มีผลสารที่มีลักษณะเป็นวงอะโรมาติกจับกันได้ดี และยังทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแบบผสมระหว่าง DOC กับ MT มีความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับการดูดซับ MT เชิงเดี่ยว โดยปรากฏการณ์

ที่อาจเกิดขึ้นมีดังต่อไปนี้ ปรากฏการณ์แรกเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุล MT กับพื้นผิวจากผลของหมู่ไฮดรอกซิลบนขอบของ GO ที่แสดงไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) กับพื้นผิวไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) ของ MT เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน ปรากฏการณ์ที่สอง เกิดการดูดซับของ DOC บนพื้นผิว GO ด้วยแรง $\pi-\pi$ interaction (Apul และคณะ, 2013) ปรากฏการณ์ที่สามอาจเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ MT กับ DOC ผ่าน $\pi-\pi$ electron donor-acceptor ระหว่างวงอะโรมาติกของ MT และ DOC เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน แสดงกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.11 (A)

SP จากรูป 4.14 (B) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับ DOC แข็งได้ดีเนื่องจากความซับซ้อนของหมู่ฟังก์ชันบน DOC และ พื้นผิวของของ Fe_3O_4 ที่ถูกล้อมรอบด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายน้ำเย็นย่นรวมกับผลของ FT-IR (4.2 B) ทำให้พื้นผิวของตัวกลางดูดซับแสดงไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) จึงเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของ DOC ในบริเวณพื้นผิวที่แสดงไดโพลโมเมนต์เป็นบวก (δ^+) ทำให้จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่ผลของการดูดซับแบบ MT แข็งเดียวนั้น SP ไม่สามารถดูดซับ MT ได้เลยเนื่องจาก MT มีสภาพเป็นกลาง สำหรับการดูดซับแบบผสมพบว่าความสามารถในการดูดซับ MT เพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ MT กับ DOC ผ่าน $\pi-\pi$ electron donor-acceptor ระหว่างวงอะโรมาติกของ MT และ DOC ทำให้ DOC ที่ถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับอาจเกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลของ MT ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง แสดงกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.11 (B)

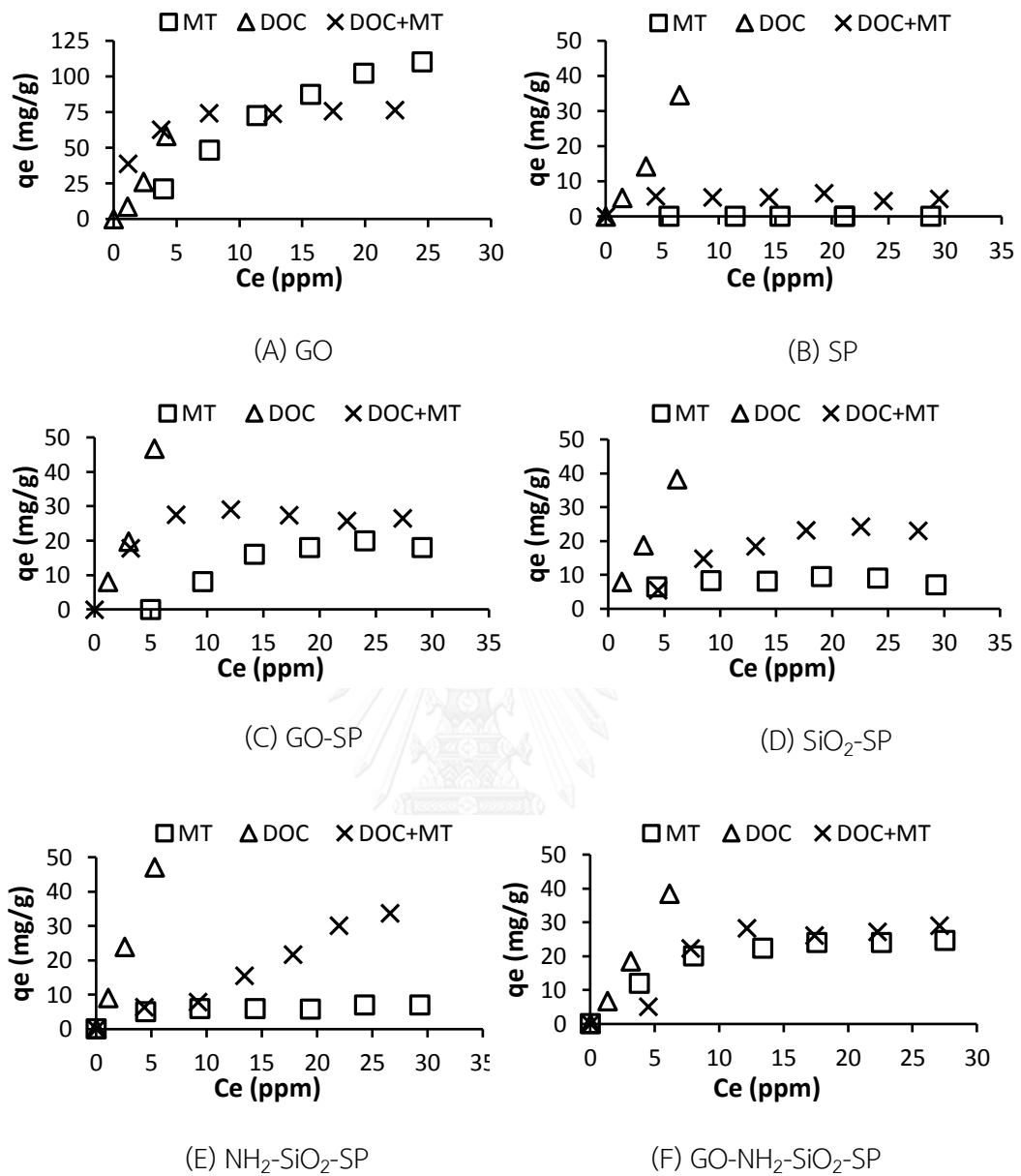
GO-SP จากรูป 4.14 (C) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับ DOC แข็งได้ดีเนื่องจากผลของแรง $\pi-\pi$ interaction ระหว่าง DOC กับตัวกลางดูดซับ และผลจากไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) ของ SP ที่ถูกล้อมรอบด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนจากสารละลายน้ำกับพื้นผิวไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) ของ DOC ส่วนความสามารถในการดูดซับ MT แข็งเดียวนั้น (Hu และคณะ, 2011) สามารถดูดซับได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจาก Fe_3O_4 ไปบดบังพื้นที่ผิวจำเพาะ และชั้นของกราฟีนออกไซด์ จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่จำเป็นต่อการดูดซับ MT ลดลง สำหรับการดูดซับแบบผสมนั้นมีความสามารถในการดูดซับ MT สูงขึ้นอาจเนื่องจากเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ MT กับ DOC ผ่าน $\pi-\pi$ electron donor-acceptor ระหว่างวงอะโรมาติกของ MT และ DOC ทำให้ DOC ที่ถูกดูดซับเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับ MT บริเวณใกล้เคียง แสดงกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.11 (C)

SiO_2 -SP จากรูป 4.14 (D) มีความสามารถดูดซับ DOC แข็งได้ดีเนื่องจากผลจากไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) ของพื้นผิวซิลิกา กับพื้นผิวไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) ของ DOC ส่วนความสามารถในการดูดซับ MT แข็งเดี่ยวพบว่าสามารถดูดซับได้เล็กน้อยเนื่องจากความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวซิลิกา และเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับเชิงผสมความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นโดยอาจจะมีสาเหตุมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ MT กับ DOC ผ่าน $\pi-\pi$ electron donor-acceptor ระหว่างวงอะโรมาติก ของ MT และ DOC ทำให้ DOC ที่ถูกดูดซับอาจเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับ MT ใกล้เคียง แสดงกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.11 (D)

NH_2-SiO_2-SP จากรูป 4.14 (E) มีความสามารถในการดูดซับ DOC แข็งได้ดี เนื่องจากพื้นผิวที่มีไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) กับโครงสร้างโมเลกุลบางส่วนของ DOC ที่มีไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่วนความสามารถในการดูดซับ MT แข็งเดี่ยวพบว่า

สามารถดูดซับได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจากผลของพื้นผิวซิลิกาที่ชอบน้ำ (Atia และคณะ, 2009) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับแบบผสม พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับ MT เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งอาจเกิดจากประจุที่เป็นบวกของหมู่เอมีน เหนี่ยวนำประจุลบของ MT ทำให้เกิดแรงดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิตย์ นอกจากนี้ความหนาแน่นของประจุเอมีนบนพื้นผิวทำให้ลดการเกาะกลุ่มของ DOC บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับเป็นผลให้หมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการดูดซับ MT คงเหลือมากขึ้น ดังนั้นพื้นผิวจำเพาะและหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมต่อการดูดซับ MT จึงเพิ่มขึ้น แสดงกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.11 (E)

GO-NH₂-SiO₂-SP จากรูป 4.14 (F) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับ DOC ได้โดยอาศัยคุณสมบัติของพื้นผิวกราฟีนออกไซด์ที่เป็นวงอะโรมาติก กับวงเบนซินของ DOC เกิดพันธะ π - π และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางสังเคราะห์ที่มีไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) กับโครงสร้างโมเลกุลบางส่วนของ DOC ที่มีไดโพลโมเมนต์เป็นลบ (δ^-) ส่วนความสามารถในการดูดซับ MT เชิงเดี่ยว (Li และคณะ, 2015) และแบบผสมนั้นมีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเทียบกับ GO แล้วถือว่ายังมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจนเนื่องจากอนุภาคของแมกเนติก (Fe₃O₄) ที่แทรกไปในชั้นของกราฟีนบดบังพื้นผิวที่จำเป็นต่อการดูดซับ MT แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณกราฟีนออกไซด์ต่อน้ำหนักแล้วพบว่า GO-NH₂-SiO₂-SP มีเปอร์เซ็นต์กราฟีนออกไซด์เพียง 25% ดังนั้นถ้าเทียบกับอัตราส่วนกราฟีนออกไซด์ที่ 100% จะได้ประสิทธิภาพการดูดซับโมเลกุลของ MT ที่สูงกว่า กราฟีนออกไซด์สังเคราะห์ (GO) ถึงแม้ผลจากการต่อหมู่เอมีนจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ดีขึ้นจากผลของหมู่เอมีนที่ทำให้พื้นผิวบางตำแหน่งแสดงไดโพลโมเมนต์ที่เป็นบวก (δ^+) ไปเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับไดโพลโมเมนต์ที่เป็นลบ (δ^-) ของ MT ด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4.11 (F) แต่ประสิทธิภาพการดูดซับแบบผสมถือว่ายังต่ำเนื่องจากการบดบังของ Fe₃O₄ ที่พื้นผิวของกราฟีนออกไซด์อ้างอิงจากผล XRD ดังรูป 4.4 (F1-3)



รูปที่ 4.14 ผลของสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 2 mg-C/L ต่อการดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนตัวกลางดูดซับ (A) GO (B) SP (C) GO-SP (D) SiO₂-SP (E) NH₂-SiO₂-SP และ (F) GO-NH₂-SiO₂-SP (ควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.6 การศึกษากระบวนการดูดซับ MT เชิงเดี่ยวและแบบผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์ในระดับความเข้มข้น ไมโครกรัมต่อลิตร

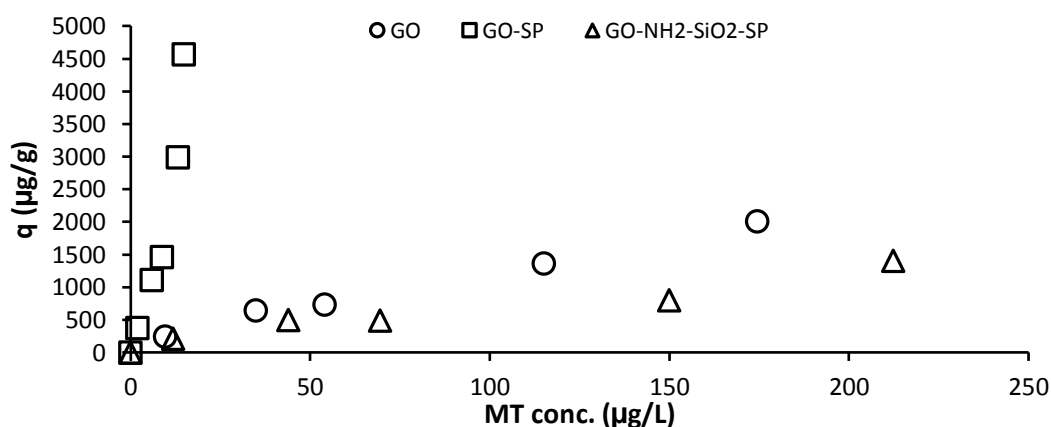
4.6.1 การสกัดความเข้มข้นด้วย Solid phase extraction (SPE)

จากงานวิจัยก่อนนี้พบว่าปริมาณความเข้มข้นของ MT ที่พบในสิ่งแวดล้อมอยู่ในระดับนาโนกรัมต่อลิตร และไมโครกรัมต่อลิตร จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาในระดับความเข้มข้นที่ต่ำๆ โดยการทดลองได้เตรียม MT ที่ความเข้มข้น 0 25 75 100 200 และ 300 $\mu\text{g/L}$ ใช้ cartridge c-18 กำหนดให้บรรจุตัวทำละลาย เท่ากับ 5 ml ยกเว้นสารตัวอย่างทำการบรรจุ 80 ml ซึ่งแบ่งขั้นตอนการสกัดออกเป็น 4 ขั้นตอน 1) condition เป็นขั้นตอนที่ทำให้ cartridge อิ่มตัวด้วยตัวทำละลาย (ethyl acetate และ acetonitrile) แล้วล้างด้วย DI 18.2 Ω เพื่อปรับสภาพขั้วบนผิวของ cartridge ให้เป็นกลาง 2) loading เป็นขั้นตอนที่ใส่ตัวอย่างที่สนใจ 3) ล้างด้วย DI 18.2 Ω เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการให้ออกจากระบบ 4) ขั้นตอนการชะล้าง (methanol) เพื่อชะ MT ให้หลุดออกจาก cartridge จากกระบวนการดังกล่าวจะเพิ่มความเข้มข้นของ MT 40 เท่า ทำให้ความเข้มข้นของ MT อยู่ในช่วง มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อให้สามารถตรวจสอบด้วย HPLC ได้ จากผลการทดลองพบว่าได้ค่า %recovery เท่ากับ 98.03 ± 1.03 % ดังแสดงในรูปที่ จ.1

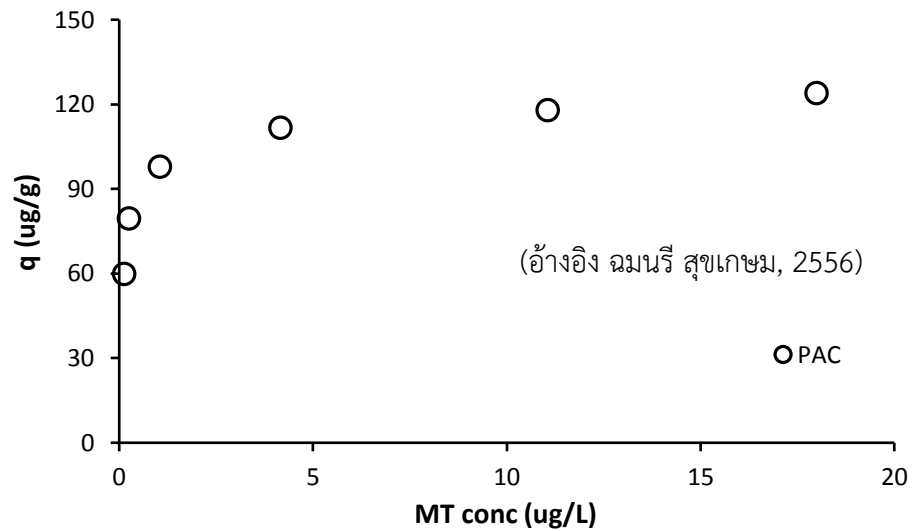
4.6.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นระดับไมโครกรัมต่อลิตร

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นต่ำระดับไมโครกรัมต่อลิตร บนตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP ด้วย high performance liquid chromatography (HPLC) โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 25 75 100 200 และ 300 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส ควบคุม ionic strength ที่ 0.01 โมลต่อลิตร เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับที่ 0.01 กรัมในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ที่ pH 7 จากผลการทดลองพบว่า GO-SP มีประสิทธิภาพสูงกว่า GO และ GO-NH₂-SiO₂-SP ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 เนื่องจาก GO-SP มีสภาพเป็นกลางทางประจุในสารละลายน้ำที่ pH 7 แสดงดังตารางที่ 4.3 จึงทำให้พื้นผิวมีความเหมาะสมต่อการ ดูดซับ MT ทำให้ความสามารถในการดูดซับ MT สูงกว่า สำหรับ GO และ GO-NH₂-SiO₂-SP จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นลบ เนื่องจากการ protonate ไฮโดรเจนไอออนในสถานะที่ pH ของฟอสเฟสบัฟเฟอร์เท่ากับ 7 เพราะค่า pHzpc ของตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากับ 2.84 และ 4.52 ตามลำดับ จึงเกิดแรงผลักจากไฟฟ้าสถิตย์จากประจุบนตัวกลางดูดซับและ MT ทำให้ความสามารถในการดูดซับต่ำกว่า GO-SP แม้จะมีปริมาณของกราฟีนออกไซด์ต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าก็ตาม และเมื่อเปรียบเทียบกับ PAC ดังรูปที่ 4.16 พบว่าตัวกลางดูดซับทั้งสามชนิดมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่า อาจเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันและความเป็นรูพรุนที่หลากหลายทำให้ไอออนในสารละลายน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับบดบังการแพร่เข้าสู่รูพรุนของ PAC

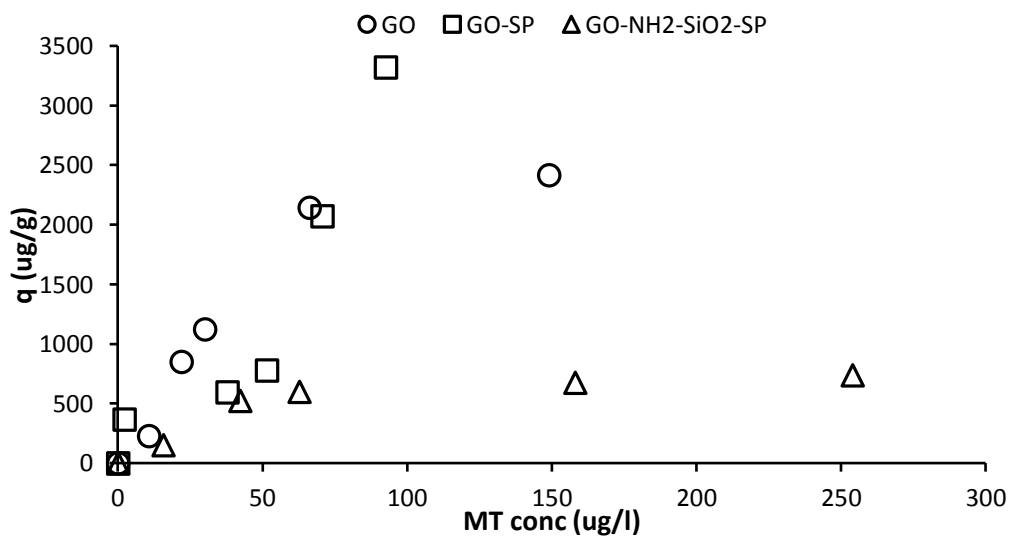
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ความเข้มข้นระดับไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์แสดงประสิทธิภาพการดูดซับดังต่อไปนี้ $GO-SP > GO > GO-NH_2-SiO_2-SP$ ดังรูปที่ 4.18 เนื่องจาก GO-SP มีสภาพเป็นกลางในสารละลายน้ำ จึงทำให้พื้นผิวมีความเหมาะสมต่อการดูดซับ MT ทำให้มีความสามารถในการดูดซับ MT ได้มากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับ MT ซึ่งเดี่ยวยจะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องจากเกิดการแย่งจับกันของ DOC บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับด้วยพันธะ $\pi-\pi$ จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ MT ลดลง สำหรับ GO พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นเนื่องจาก DOC ที่มายึดติดบนผิวของกราฟีนออกไซด์ ดูดซับโมเลกุลของ MT ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ส่วน $GO-NH_2-SiO_2-SP$ นั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งเดี่ยวย และแบบผสมที่ใกล้เคียงกันเพราะอนุภาคของ Fe_3O_4 ที่มาแทรกบนชั้นของกราฟีนออกไซด์บดบังพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับ อีกทั้งหมู่เอมีนยังทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของตัวกลางดูดซับสูงขึ้น และเกิดการแย่งจับกันของ DOC บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะต่อการดูดซับ MT ลดลง ประสิทธิภาพในการดูดซับ MT จึงลดลงอย่างมีนัย



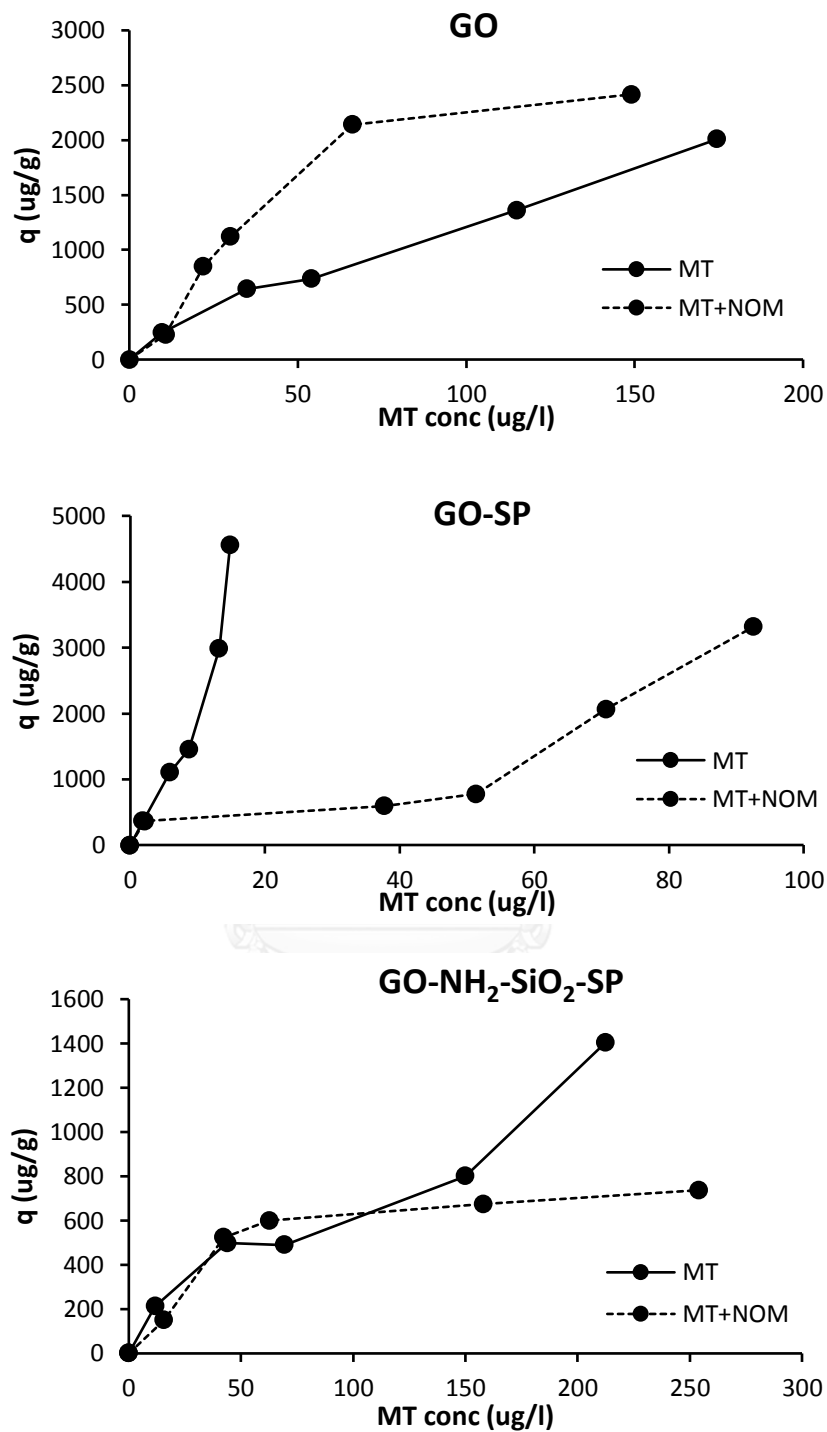
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรบนตัวกลางดูดซับ GO-SP และ $GO-NH_2-SiO_2-SP$ (ควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีสารอินทรีย์บนตัวกลางดูดซับ PAC (ควบคุม pH เท่ากับ 7 ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอนุหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)
(ฉมนรี สุขเกษม, 2556)



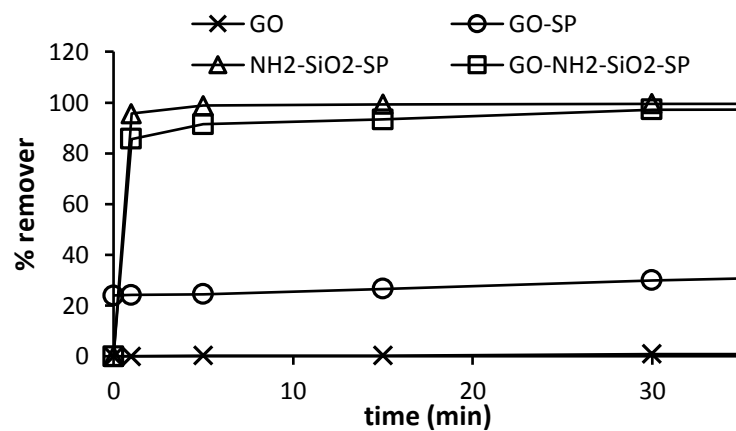
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการดูดซับ MT ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีสารอินทรีย์บนตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP (ควบคุม pH เท่ากับ 7 ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และอนุหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



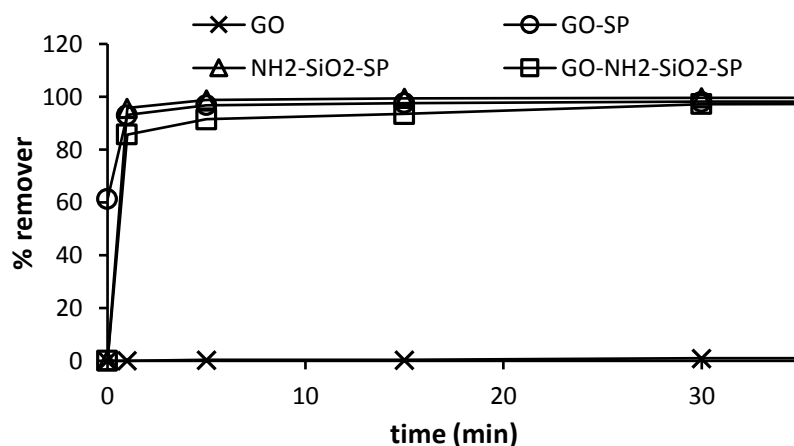
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ MT เชิงเดี่ยวและแบบผสมในกรณีที่มีสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตร บนตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP (ควบคุม pH เท่ากับ 7 ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.7 ประสิทธิภาพในการแยกออกด้วยแผ่นแม่เหล็ก

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับด้วยแผ่นแม่เหล็ก แล้ววิเคราะห์ความขุ่นด้วยเครื่อง NTU ในกรณีที่ทำการอัลตราโซนิก และ ไม่อัลตราโซนิก ตัวกลางดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าในกรณีที่ไม้อัลตราโซนิก ตัวกลางดูดซับทั้งสาม สามารถแยกออกจากสารละลายได้ถึง 90% เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที แต่สำหรับ GO-SP ในกรณีที่อัลตราโซนิก แล้วพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีสามารถแยกตัวกลางดูดซับได้เพียง 24% เนื่องจากกราฟีนออกไซด์แยกออกจาก SP ทำให้ค่าความขุ่นที่วัดได้จึงมาจากกราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับ (GO GO-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) ด้วยแผ่นแม่เหล็ก โดยควบคุม pH เท่ากับ 7 ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ใช้อัลตราโซนิก)



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับ (GO GO-SP NH₂-SiO₂-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) ด้วยแผ่นแม่เหล็ก โดยควบคุม pH เท่ากับ 7 ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร GO 0.05 g/L และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ไม่ใช้อัลตราโซนิก)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ (GO) อนุภาคแมกเนติก (SP) กราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดกับอนุภาคแมกเนติก (GO-SP) อนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกา (SiO₂-SP) และกราฟีนออกไซด์ที่ต่อติดอนุภาคแมกเนติกที่เคลือบด้วยซิลิกาและต่อติดหมู่อะมิโน (GO-NH₂-SiO₂-SP) จากนั้นทำการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ MT รวมถึงประสิทธิภาพการดูดซับแบบคัดเลือกของตัวกลางดูดซับ กราฟีนออกไซด์ที่ทำการดัดแปลงหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของซิลิกา และความสามารถในการแยกด้วยแม่เหล็ก

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ พบว่าผลจาก XRD สามารถระบุว่าตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ GO-SP มีความเป็นผลึกลดลงเนื่องจากการบดบังของอนุภาค Fe₃O₄ บนพื้นผิวและชั้นของกราฟีนออกไซด์ สำหรับ GO-NH₂-SiO₂-SP พบว่าหมู่เอมีนไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึก แต่เมื่อนำซิลิกาที่ต่อหมู่เอมีนและมีสมบัติแมกเนติกต่อติดกับกราฟีนออกไซด์ จะทำให้ความเป็นผลึกของตัวกลางดูดซับสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยสามารถยืนยันผลการต่อติดเอมีนจากผล FT-IR นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปริมาณกราฟีนออกไซด์ในตัวกลางดูดซับ GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP

จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับทั้ง 4 ชนิด (GO SP GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP) พบว่า SP ไม่สามารถดูดซับ MT ได้ สำหรับตัวกลางดูดซับ GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP จะเกิดการดูดซับได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นจะเกิดการดูดซับ-คายซับในอีกระยะหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่สมดุล เมื่อนำความสัมพันธ์ของสมการในการดูดซับ ต่อเวลาใดๆ ไปคำนวณในสมการ pseudo 1 order และ pseudo 2 order พบว่า GO GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP เหมาะสมกับสมการเชิงเส้น pseudo 2 order และเมื่อวิเคราะห์จากค่า k ของสมการ pseudo 2 order ทำให้ทราบว่า GO จะมีอัตราเร็วในการดูดซับและการเข้าสู่สมดุลการดูดซับช้ากว่า GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP ตามลำดับแต่มีปริมาณ MT ที่ถูกดูดซับต่อเวลาสูงกว่า GO-SP และ GO-NH₂-SiO₂-SP

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ MT เชิงเดี่ยวพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับ $GO > GO-NH_2-SiO_2-SP > GO-SP > SiO_2-SP > NH_2-SiO_2-SP > SP$ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับ MT แบบผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับ MT บนตัวกลางดูดซับทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะโครงสร้างและ หมู่ฟังก์ชันที่ซับซ้อนของ DOC อาจทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวหรือหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับกับ DOC จากนั้น MT บริเวณใกล้เคียงจะเกิดการสร้างพันธะกับโครงสร้างโมเลกุลของ DOC ที่อยู่บนตัวกลางดูดซับ สำหรับผลการศึกษา ประสิทธิภาพการดูดซับ MT เชิงเดี่ยวและแบบผสมที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตรพบว่าได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของ กราฟีนออกไซด์บนตัวกลางดูดซับ $GO-SP$ และ $GO-NH_2-SiO_2-SP$ เห็นได้ว่าจะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงกว่า GO เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นจะเกิดการเกาะเป็นกลุ่มก้อนทำให้พื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันที่จำเพาะต่อการดูดซับลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจึงต่ำลง ส่วนสาเหตุที่ตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ที่ต่อดิตบน SP หรือ NH_2-SiO_2-SP มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่า GO เมื่อเทียบในสัดส่วนของกราฟีนออกไซด์ที่เท่ากันเพราะหมู่เอมีนหรืออนุภาคแมกเนติก จะช่วยตรึงกราฟีนออกไซด์ไม่ให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนจึงทำให้ความมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้สมบัติความเป็นแม่เหล็ก

จากความสามารถในการแยกด้วยแผ่นแม่เหล็กในกรณีที่มีการใช้อัลตราโซนิกพบว่า NH_2-SiO_2-SP และ $GO-NH_2-SiO_2-SP$ สามารถแยกออกจากสารละลายโดยใช้การเหนี่ยวนำของแผ่นแม่เหล็กได้ถึง 90% ภายใน 5 นาที แต่สำหรับ $GO-SP$ ใช้เวลาประมาณ 1 วันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดถึง 90% เนื่องจากเมื่อ $GO-SP$ ที่ผ่านการอัลตราโซนิกจะทำให้กราฟีนออกไซด์หลุดออกจากอนุภาคแมกเนติก ทำให้ค่าความขุ่นที่วัดได้นั้นมาจากกราฟีนออกไซด์ ส่วนในกรณีที่ไม่มีการใช้อัลตราโซนิกพบว่า $GO-SP$ และ $GO-NH_2-SiO_2-SP$ สามารถแยกออกจากสารละลายได้ถึง 90% ภายใน 5 นาที เนื่องจากโครงสร้างของ $GO-SP$ ยังคงความเป็นผลึกอยู่ สำหรับ $GO-NH_2-SiO_2-SP$ ยังสามารถรักษาประสิทธิภาพในการแยกด้วยแผ่นแม่เหล็กให้คงเดิม เนื่องจากหมู่เอมีนที่ต่อดิตกับกราฟีนออกไซด์จะช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะระหว่าง GO กับ SiO_2-SP ทำให้ไม่เกิดการหลุดออกของกราฟีนออกไซด์เมื่อผ่านการใช้อัลตราโซนิก

จากผลการต่อดิตกราฟีนออกไซด์ (และ กราฟีนออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยหมู่อะมิโน) บนพื้นผิวของอนุภาคสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งที่เคลือบ ($GO-NH_2-SiO_2-SP$) และไม่เคลือบด้วยซิลิกา ($GO-SP$) พบว่า $GO-SP$ จะมีปริมาณกราฟีนออกไซด์มากกว่า $GO-NH_2-SiO_2-SP$ ในน้ำหนักหนึ่งหน่วยจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับ MT เชิงเดี่ยวและแบบผสมได้ดีกว่าแต่เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการแยกด้วยแผ่นแม่เหล็ก พบว่าเมื่อผ่านการอัลตราโซนิกกราฟีนออกไซด์จะหลุดออกจากอนุภาคแมกเนติก ทำให้ทราบแน่ชัดว่าเมื่อนำไปใช้จริงกับการบำบัด MT ในสิ่งแวดล้อม จะเกิดการตกค้างของกราฟีนออกไซด์ ส่วน $GO-NH_2-SiO_2-SP$ ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด MT เชิงเดี่ยวและแบบผสมที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนของปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่ต่ำกว่าต่อน้ำหนัก

หนึ่งหน่วยแต่มีประสิทธิภาพในการแยกด้วยแผ่นแม่เหล็กสูงกว่าทั้งในกรณีที่ผ่านมาการอัลตราโซนิกและไม่อัลตราโซนิกเนื่องจากหมู่เอมีนจะช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับตัวกลางดูดซับ GO-NH₂-SiO₂-SP ทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่าง GO กับ SiO₂-SP มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจึงมีความเหมาะสมมากกว่าในการนำไปใช้กับการบำบัด MT ในแหล่งน้ำธรรมชาติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีสังเคราะห์ที่ทำให้ปริมาณกราฟีนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น
2. ศึกษาการละลายของ GO ที่หลุดออกจากตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์
3. ศึกษาการนำตัวกลางดูดซับสังเคราะห์มาใช้ใหม่และผลจากอนุภาคแมกเนติกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลังการดูดซับ



รายการอ้างอิง

17 alphamethyltestosterone. [Online]. 2015 Available from:

http://www.car.chula.ac.th/readerweb/web/reference_format.html

Apul, O. G., Wang Q., Zhou Y., and Karanfil T. (2013). "Adsorption of aromatic organic contaminants by graphene nanosheets: Comparison with carbon nanotubes and activated carbon." Water Research **47**(4): 1648-1654.

Atia, A. A., Donia A. M., and Al-Amrani W. A. (2009). "Adsorption/desorption behavior of acid orange 10 on magnetic silica modified with amine groups." Chemical Engineering Journal **150**(1): 55-62.

Blankvoort, B. M., et al. (2005). "Androgenic activity in surface water samples detected using the AR-LUX assay: indications for mixture effects." Environmental toxicology and pharmacology **19**(2): 263-272.

Cai, N. and Larese-Casanova P. (2014). "Sorption of carbamazepine by commercial graphene oxides: a comparative study with granular activated carbon and multiwalled carbon nanotubes." Journal of colloid and interface science **426**: 152-161.

Chen, H., Gao B., and Li H. (2015). "Removal of sulfamethoxazole and ciprofloxacin from aqueous solutions by graphene oxide." Journal of hazardous materials **282**: 201-207.

Choi, E.-Y., et al. (2010). "Noncovalent functionalization of graphene with end-functional polymers." Journal of Materials Chemistry **20**(10): 1907-1912.

- Choi, W., Lahiri I., Seelaboyina R., and Kang Y. S. (2010). "Synthesis of graphene and its applications: a review." Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences **35**(1).
- Croue, J., et al. (2000) Characterization of natural organic matter in drinking water America:
- Dikin, D. A., et al. (2007). "Preparation and characterization of graphene oxide paper." Nature **448**(7152): 457-460.
- Dou, J., Liu X., Hu Z., and Deng D. (2008). "Anaerobic BTEX biodegradation linked to nitrate and sulfate reduction." Journal of hazardous materials **151**(2): 720-729.
- Dreyer, D. R., Park S., Bielawski C. W., and Ruoff R. S. (2010). "The chemistry of graphene oxide." Chemical Society Reviews **39**(1): 228-240.
- Gao, J., et al. (2015). "Effects of 17 α -methyltestosterone on transcriptome, gonadal histology and sex steroid hormones in rare minnow *Gobiocypris rarus*." Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics.
- Gao, Y., et al. (2012). "Adsorption and removal of tetracycline antibiotics from aqueous solution by graphene oxide." Journal of colloid and interface science **368**(1): 540-546.
- González, M. G., Baselga J., and Cabanelas J. C. (2012). Applications of FTIR on epoxy resins-identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake, INTECH Open Access Publisher.

- Gupta, A. K. and Wells S. (2004). "Surface-modified superparamagnetic nanoparticles for drug delivery: preparation, characterization, and cytotoxicity studies." IEEE transactions on nanobioscience **3**(1): 66-73.
- Homklin, S., Ong S. K., and Limpiyakorn T. (2011). "Biotransformation of 17 α -methyltestosterone in sediment under different electron acceptor conditions." Chemosphere **82**(10): 1401-1407.
- Hu, X., et al. (2011). "Adsorption and heterogeneous Fenton degradation of 17 α -methyltestosterone on nano Fe₃O₄/MWCNTs in aqueous solution." Applied Catalysis B: Environmental **107**(3): 274-283.
- Legros, T., et al. (2000). "The effects of 17 alpha-methyltestosterone on myocardial function in vitro." Medicine and science in sports and exercise **32**(5): 897-903.
- Li, X., Wang Z., Li Q., Ma J., and Zhu M. (2015). "Preparation, characterization, and application of mesoporous silica-grafted graphene oxide for highly selective lead adsorption." Chemical Engineering Journal **273**: 630-637.
- Lin, S., Shen C., Lu D., Wang C., and Gao H.-J. (2013). "Synthesis of Pt nanoparticles anchored on graphene-encapsulated Fe₃O₄ magnetic nanospheres and their use as catalysts for methanol oxidation." Carbon **53**: 112-119.
- Liu, X., Ma Z., Xing J., and Liu H. (2004). "Preparation and characterization of amino-silane modified superparamagnetic silica nanospheres." Journal of Magnetism and Magnetic Materials **270**(1): 1-6.
- Luo, Y.-B., Shi Z.-G., Gao Q., and Feng Y.-Q. (2011). "Magnetic retrieval of graphene: Extraction of sulfonamide antibiotics from environmental water samples." Journal of Chromatography A **1218**(10): 1353-1358.

Moore, C., et al. (2003). Study of structure and quality of different silicon oxides using FTIR and Raman microscopy. OPTO Ireland, International Society for Optics and Photonics.

Mor, G., et al. (2001). "17 α -Methyl testosterone is a competitive inhibitor of aromatase activity in Jar choriocarcinoma cells and macrophage-like THP-1 cells in culture." The Journal of steroid biochemistry and molecular biology **79**(1): 239-246.

Moradi, O., et al. (2015). "Characteristics and electrical conductivity of graphene and graphene oxide for adsorption of cationic dyes from liquids: Kinetic and thermodynamic study." Journal of Industrial and Engineering Chemistry **28**: 294-301.

Research Interests. [Online]. 2015 Available from:
<http://www.acadiau.ca/~jmurimbo/Research%20Interests%202.htm>

Nguyen-Huy, C., Kim N., Nguyen-Phan T.-D., Yoo I.-K., and Shin E. W. (2014). "Adsorptive interaction of bisphenol A with mesoporous titanasilicate/reduced graphene oxide nanocomposite materials: FT-IR and Raman analyses." Nanoscale research letters **9**(1): 1-7.

Pan, S.-D., et al. (2014). "Amine-functional magnetic polymer modified graphene oxide as magnetic solid-phase extraction materials combined with liquid chromatography–tandem mass spectrometry for chlorophenols analysis in environmental water." Journal of Chromatography A **1362**: 34-42.

Petcharoen, K. and Sirivat A. (2012). "Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method." Materials Science and Engineering: B **177**(5): 421-427.

- Pourjavadi, A., Tehrani Z. M., and Jokar S. (2015). "Functionalized mesoporous silica-coated magnetic graphene oxide by polyglycerol-g-polycaprolactone with pH-responsive behavior: Designed for targeted and controlled doxorubicin delivery." Journal of Industrial and Engineering Chemistry **28**: 45-53.
- Poursaberi, T., Hassanisadi M., and Shanehsaz M. (2012). "Amino-silica coated magnetic nanoparticles modified with Ni (II)-metalloporphyrin for the selective removal of nitrate ions from water samples." Journal of Porphyrins and Phthalocyanines **16**(04): 390-395.
- Punyapalakul, P. and Takizawa S. (2006). "Selective adsorption of nonionic surfactant on hexagonal mesoporous silicates (HMSs) in the presence of ionic dyes." Water Research **40**(17): 3177-3184.
- Rakić, V., Rac V., Krmar M., Otman O., and Auroux A. (2015). "The adsorption of pharmaceutically active compounds from aqueous solutions onto activated carbons." Journal of hazardous materials **282**: 141-149.
- Ramesha, G., Kumara A. V., Muralidhara H., and Sampath S. (2011). "Graphene and graphene oxide as effective adsorbents toward anionic and cationic dyes." Journal of colloid and interface science **361**(1): 270-277.
- Sangster, J. L., Oke H., Zhang Y., and Bartelt-Hunt S. L. (2015). "The effect of particle size on sorption of estrogens, androgens and progestagens in aquatic sediment." Journal of hazardous materials.
- Shen, J., et al. (2010). "One step synthesis of graphene oxide– magnetic nanoparticle composite." The Journal of Physical Chemistry C **114**(3): 1498-1503.

- Shokri, B., Firouzjah M. A., and Hosseini S. (2009). FTIR analysis of silicon dioxide thin film deposited by metal organic-based PECVD. Proceedings of 19th international symposium on plasma chemistry society, Bochum, Germany.
- Stocco, D. M. (2001). "StAR protein and the regulation of steroid hormone biosynthesis." Annual Review of Physiology **63**(1): 193-213.
- Traina, S. J., Novak J., and Smeck N. E. (1990). "An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids." Journal of environmental quality **19**(1): 151-153.
- Wang, Z., et al. (2012). "Modified mesoporous silica materials for on-line separation and preconcentration of hexavalent chromium using a microcolumn coupled with flame atomic absorption spectrometry." Analytica chimica acta **725**: 81-86.
- Wojnarowicz, P., Yang W., Zhou H., Parker W. J., and Helbing C. C. (2014). "Changes in hormone and stress-inducing activities of municipal wastewater in a conventional activated sludge wastewater treatment plant." Water Research **66**: 265-272.
- Xu, J., Wang L., and Zhu Y. (2012). "Decontamination of bisphenol A from aqueous solution by graphene adsorption." Langmuir **28**(22): 8418-8425.
- Xu, Y., Bai H., Lu G., Li C., and Shi G. (2008). "Flexible graphene films via the filtration of water-soluble noncovalent functionalized graphene sheets." Journal of the American Chemical Society **130**(18): 5856-5857.
- Zhang, L., Zhu M., Guo L., Li L., and Shi J. (2009). "Bilirubin adsorption property of mesoporous silica and amine-grafted mesoporous silica." Nano-Micro Letters **1**(1): 14-18.

Zhang, W. L. and Choi H. J. (2012). "Silica-graphene oxide hybrid composite particles and their electroresponsive characteristics." *Langmuir* **28**(17): 7055-7062.

Zumstein, J. and Buffle J. (1989). "Circulation of pedogenic and aquagenic organic matter in an eutrophic lake." *Water Research* **23**(2): 229-239.

ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล (2558) ผลกระทบของหมูฟังกซ์บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดเมโซพอร์ซิลิเกตและอนุภาคขนาดนาโนชนิดซูปเปอร์พาราแมกเนติกต่อการกำจัดกรดแอมโมเนียม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:

ฉมนรี สุขเกษม (2556) ผลของหมูฟังกซ์บนพื้นผิวต่อการดูดซับ 17 แอลฟาเมธิลเทสโทสเตอโรน โดยตัวกลางดูดซับซิลิเกต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:

ณัฐพร เอี่ยมสะอาด (2557) การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 และการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูปเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ดัดแปรพื้นผิว ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
HPLC โครมาโตแกรมของ MT และ DOC

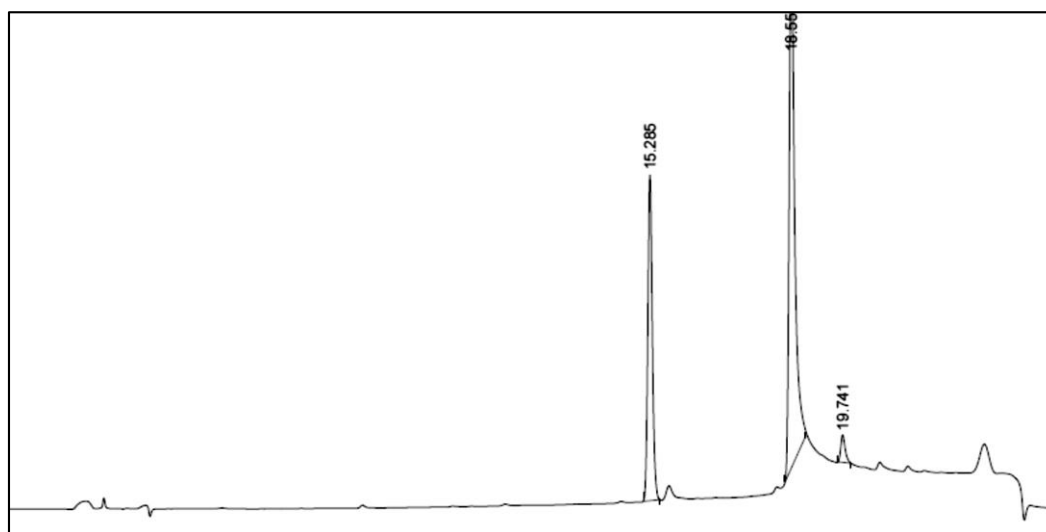
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ MT และ DOC ด้วยเครื่องวิเคราะห์ HPLC

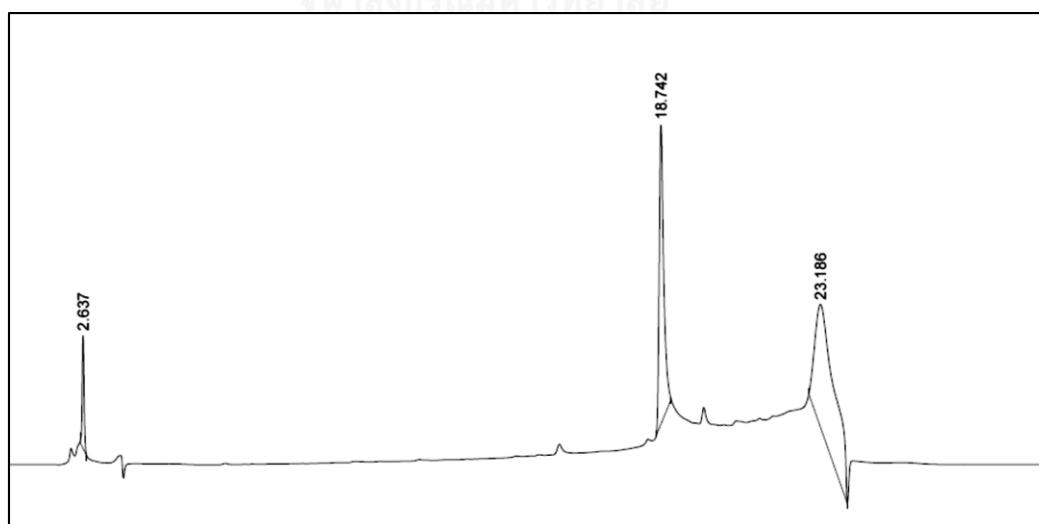
มลสาร	MT	DOC
Retention Time	15.285	2.637
Detection Limit	50 ไมโครกรัมต่อลิตร	1 มิลลิกรัมต่อลิตร

* Retention time คือเวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์

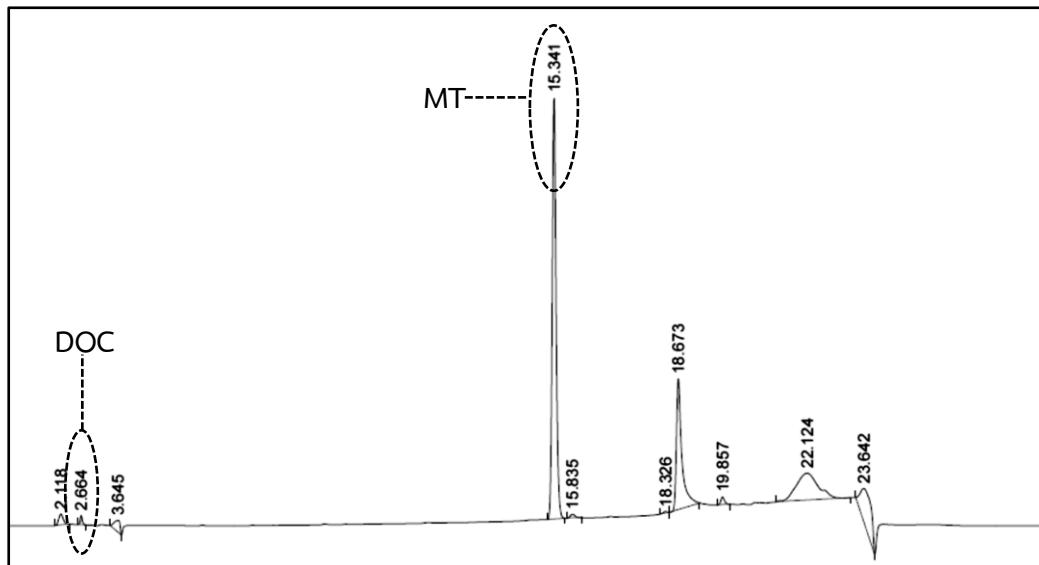
**Detection limit หรือ Limit of Detection (LOD) คือความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้



รูปที่ ก.1 โครมาโตแกรมของ MT Retention time 15.285 นาที (คอลัมน์ C8)



รูปที่ ก.2 โครมาโตแกรมของ DOC Retention time 2.637 นาที (คอลัมน์ C8)



รูปที่ ก.3 โครมาโตแกรมของ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์ (DOC) พบ Retention time ของ MT และ DOC 15.341 และ 2.664 นาที ตามลำดับ (คอลัมน์ C8)



การวิเคราะห์ความเข้มข้น MT จากเครื่องแยกวิเคราะห์ประสิทธิภาพสูง ด้วย HPLC UV Detector

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) (1100 Series, Agilent, Germany) คอลัมน์ C8
2. Stock solution MT ความเข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. สารละลายมาตรฐาน MT ความเข้มข้น 2 6 12 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. เมทานอล
5. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ไมโครปิเปต

การเตรียม stock solution ของ MT

1. ชั่ง MT หนัก 0.0026 (MT >97%, Aldamax Limited)
2. ละลาย MT ด้วยเมทานอลในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เก็บ Stock solution ในขวดสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน MT

1. ปิเปตสารละลาย MT จาก Stock solution ตามปริมาตรในตารางที่ ข.1 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร คำนวณจากสมการ (1)

$$C_1V_1=C_2V_2 \quad (1)$$

2. ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการปรับปริมาตร

ตารางที่ ข.1 สัดส่วนปริมาตรของ MT ที่ปิเปต

ความเข้มข้นของ MT (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร)
2	0.10
6	0.30
12	0.60
30	1.50

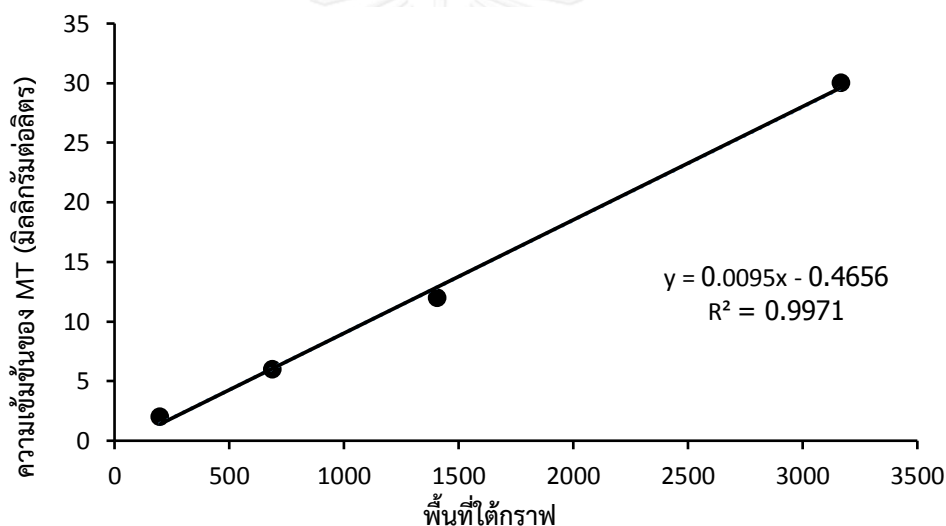
การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC UV detector ที่ความยาวคลื่น 245 นาโนเมตร
2. สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ ข.2 พื้นที่ใต้กราฟของ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ MT (มิลลิกรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
2	197.00
6	688.20
12	1408.20
30	3168.20

กราฟมาตรฐานของ MT



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของ MT (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC)

การคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง MT

นำตัวอย่าง MT จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-UV มาแทนค่าลงในสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

การวิเคราะห์ความเข้มข้น MT ที่ความเข้มข้นต่ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร) จากเครื่องแยกวิเคราะห์ประสิทธิภาพสูง ด้วย HPLC UV Detector

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) (1100 Series, Agilent, Germany) คอลัมน์ C8
2. Stock solution MT ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. สารละลายมาตรฐาน MT ความเข้มข้น 0 20 200 และ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. เมทานอล
5. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ไมโครปิเปต

การเตรียม stock solution ของ MT

1. ตึง MT stock solution 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 0.25 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรสารละลาย MT ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่พีเอช 7 จนได้ปริมาตรสุทธิ 100 มิลลิลิตร
3. เก็บ Stock solution ในขวดสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน MT

1. ปิเปตสารละลาย MT จาก Stock solution ตามปริมาตรในตารางที่ ข.3 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร คำนวณจากสมการ (1)

$$C_1V_1=C_2V_2 \quad (1)$$

2. ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการปรับปริมาตร

ตารางที่ ข.3 สัดส่วนปริมาตรของ MT ที่ปิเปต

ความเข้มข้นของ MT (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร)
20	0.40
200	4.00
350	7.00

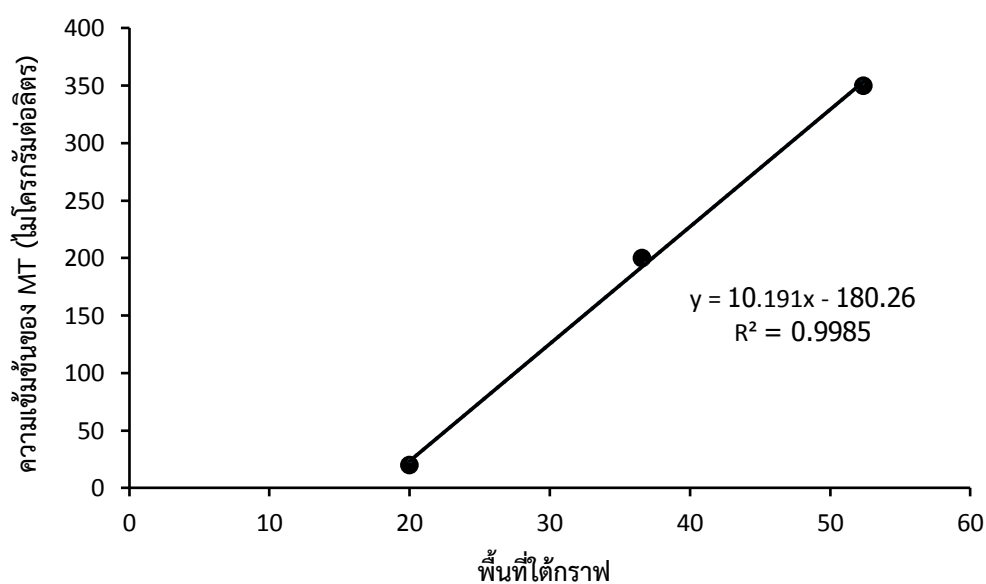
การสร้างกราฟมาตรฐาน

- นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC UV detector ที่ความยาวคลื่น 245 นาโนเมตร
- สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ ข.4 พื้นที่ใต้กราฟของ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ MT (มิลลิกรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
20	20
200	36.6
350	52.4

กราฟมาตรฐานของ MT



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของ MT (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC)

การวิเคราะห์ความเข้มข้น MT จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Genesys 10 UV Scanning, Single cell holder, Thermo Fisher Scientific, USA)
2. Stock solution MT ความเข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. สารละลายมาตรฐาน MT ความเข้มข้น 0 6 12 24 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. เมทานอล
5. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ไมโครปิเปต
8. คิวเวต

การเตรียม stock solution ของ MT

1. ชั่ง MT หนัก 0.0026 (MT >97%, Aldamax Limited)
2. ละลาย MT ด้วยเมทานอลในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เก็บ Stock solution ในขวดสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน MT

1. ปิเปตสารละลาย MT จาก Stock solution ตามปริมาตรในตารางที่ ข.1 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร คำนวณจากสมการ (1)

$$C_1V_1=C_2V_2 \quad (1)$$

2. ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการปรับปริมาตร

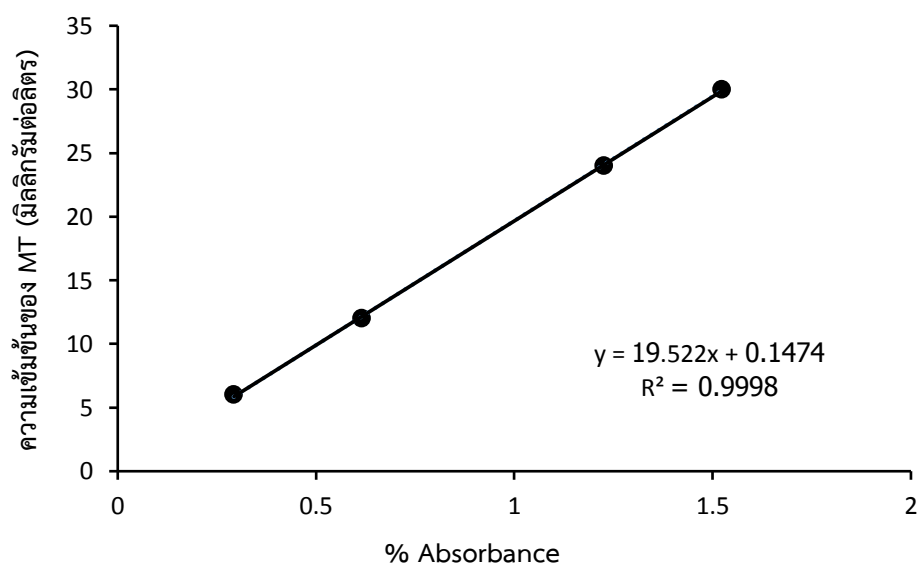
การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC UV detector ที่ความยาวคลื่น 245 นาโนเมตร
2. สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ ข.5 พื้นที่ใต้กราฟของ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ MT (มิลลิกรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
6	0.293
12	0.615
24	1.226
30	1.524

กราฟมาตรฐานของ MT



การวิเคราะห์ความเข้มข้น DOC จากเครื่องแยกวิเคราะห์ประสิทธิภาพสูง ด้วย HPLC UV Detector

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) (1100 Series, Agilent, Germany) คอลัมน์ C8
2. Stock solution DOC ความเข้มข้น 14 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร (ค่าวิเคราะห์จากเครื่อง TOC)
3. สารละลายมาตรฐาน DOC ความเข้มข้น 0 1 2 6 และ 12 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร
5. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ไมโครปิเปต

การเตรียม stock solution ของ DOC

1. นำน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงปลา มา 200 มิลลิลิตร
2. กรองด้วยกระดาษกรอง PTFE 0.45 μm
3. เก็บ Stock solution ในขวดสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน DOC

1. ปิเปตสารละลาย DOC จาก Stock solution ตามปริมาตรในตารางที่ ข.6 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร คำนวณจากสมการ (1)

$$C_1V_1=C_2V_2 \quad (1)$$
2. ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ในการปรับปริมาตร

ตารางที่ ข.6 สัดส่วนปริมาตรของ DOM ที่ปิเปต

ความเข้มข้นของ DOC (มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร)	ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร)
1	7.14
2	14.28
6	42.86
12	89.71

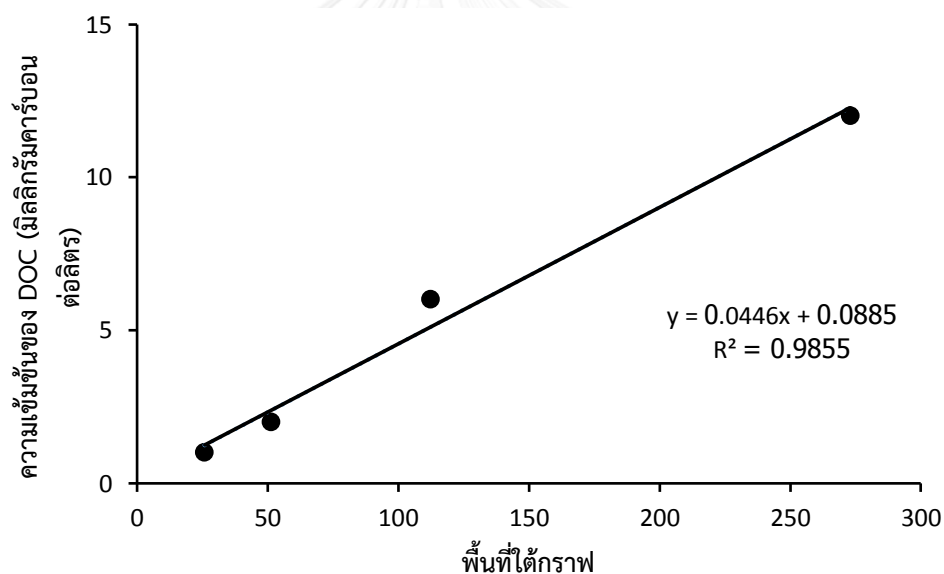
การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC UV detector ที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร
2. สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ ข.7 พื้นที่ใต้กราฟของ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ DOC (มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
1	25.90
2	51.30
6	112.30
12	273.00

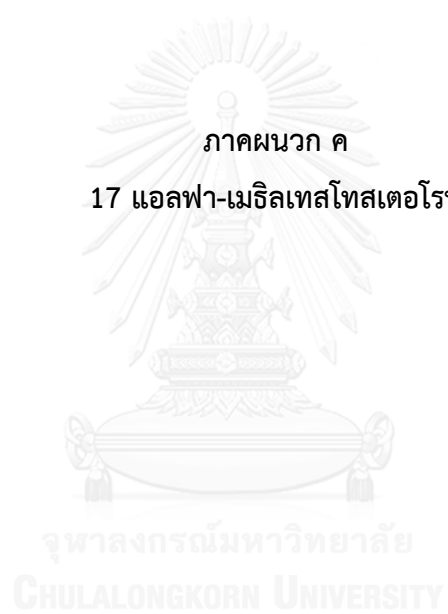
กราฟมาตรฐานของ DOC

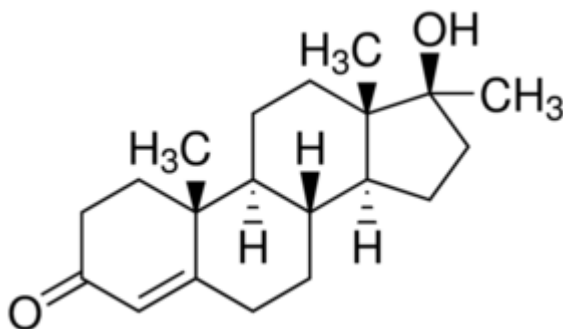


รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานของ DOC (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC)

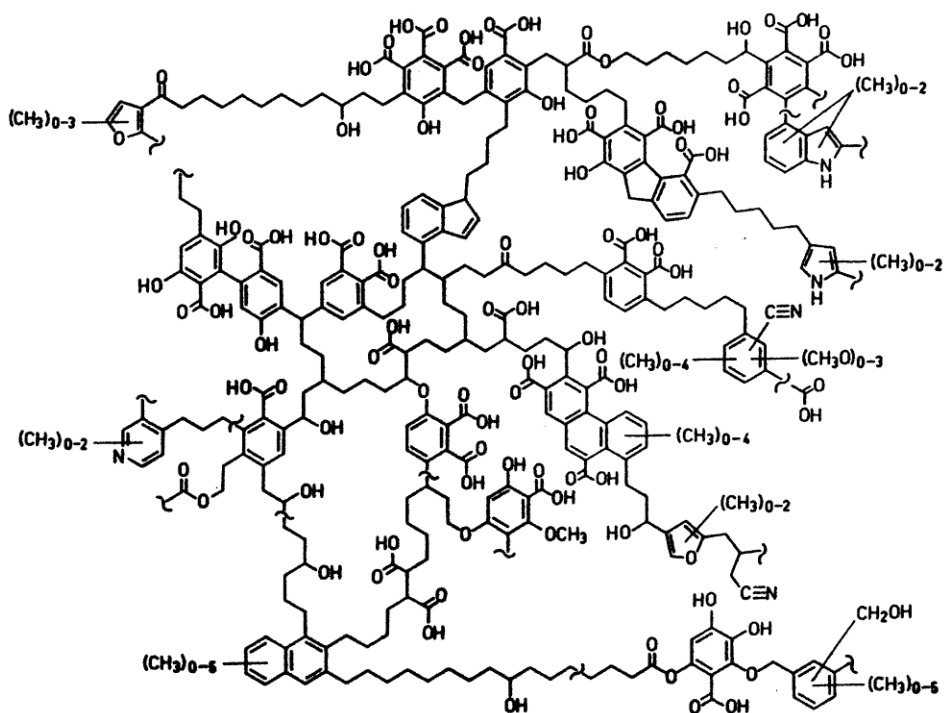
ภาคผนวก ค

17 แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน





รูปที่ ค.1 โครงสร้างของ 17 แอลฟา-เมซิลเทสโทสเตอโรน



รูปที่ ค.2 โครงสร้างของ Natural organic matter (NOM)



ตารางที่ ง.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ MT ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของ MT ที่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (mg/L)			
	GO	SP	GO-SP	GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
0	15.00	15.00	15.00	15.00
1	8.48	14.89	14.99	14.80
2	7.15	14.91	14.50	14.70
4	5.81	14.92	14.99	14.90
8	5.42	14.89	14.60	13.80
12	6.54	14.89	13.80	14.20
30	6.03	14.89	13.70	13.90
60	4.73	14.89	13.00	13.70
120	4.48	14.89	12.60	13.50
240	4.69	14.89	12.43	13.48
480	4.81	14.89	12.37	13.52
700	4.67	14.89	12.40	13.80
960	4.91	14.89	12.27	13.90
1200	4.73	14.89	12.30	13.50
1440	4.73	14.89	12.20	13.40

ตารางที่ ง.2 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ MT ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ MT ที่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (mg/g)					
	GO	SP	GO-SP	SiO ₂ -SP	NHS*	GOF**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	21.00	0.00	4.98	6.29	5.00	12.00
10	48.00	0.00	8.00	8.17	6.00	20.00
15	72.31	0.00	16.00	8.00	6.00	22.30
20	87.22	0.00	18.00	9.45	7.00	24.07
25	102.2	0.00	20.00	8.87	5.84	24.00
30	110.00	0.00	18.00	7.00	7.00	24.70

* NH₂-SiO₂-SP (NHS)

** GO-NH₂-SiO₂-SP (GOF)



ตารางที่ ง.3 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ DOM ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ DOM ที่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (mg-C/g)					
	GO	SP	GO-SP	SiO ₂ -SP	NHS*	GOF**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	8.85	5.35	8.10	7.82	9.01	6.84
5	26.16	14.28	19.81	18.65	23.98	18.60
10	58.09	34.53	46.85	38.28	47.07	38.50

* NH₂-SiO₂-SP (NHS)

** GO-NH₂-SiO₂-SP (GOF)



ตารางที่ ง.4 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์ (DOM) ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ MT แบบผสมที่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (mg/g)					
	GO	SP	GO-SP	SiO ₂ -SP	NHS*	GOF**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	38.74	5.70	17.83	5.43	6.36	5.17
10	62.55	5.44	27.63	14.76	7.84	22.39
15	74.24	5.42	29.15	18.37	15.57	28.37
20	73.89	6.61	27.40	23.13	21.76	26.09
25	75.73	4.40	25.79	24.21	30.12	27.26
30	76.48	4.93	26.60	23.00	33.78	29.10

* NH₂-SiO₂-SP (NHS)

** GO-NH₂-SiO₂-SP (GOF)

ตารางที่ ง.5 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ MT ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นต่ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ MT ที่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ($\mu\text{g/g}$)		
	GO	GO-SP	GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
0	0.00	0.00	0.00
25	246.10	370.00	211.29
75	643.32	1106.08	487.85
100	736.00	1459.93	488.70
200	1360.00	29888.66	800.00
300	2008.77	4562.52	1402.93



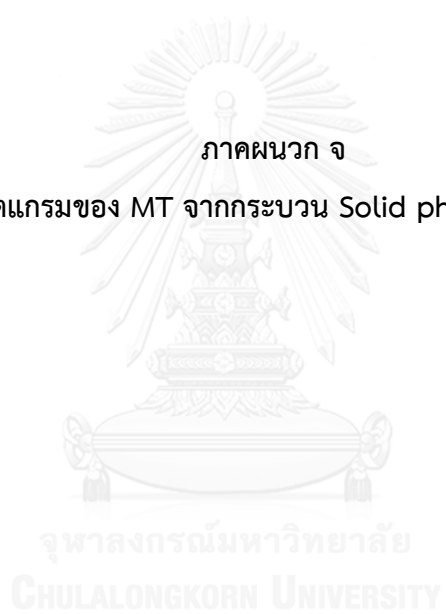
ตารางที่ ง.6 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ MT ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารอินทรีย์ (DOC) ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นต่ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ MT แบบผสมที่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ($\mu\text{g/g}$)		
	GO	GO-SP	GO-NH ₂ -SiO ₂ -SP
0	0.00	0.00	0.00
25	227.63	365.16	148.82
75	848.92	595.84	523.20
100	1120.00	777.64	598.18
200	2140.86	2068.90	673.00
300	2415.09	3319.32	736.00



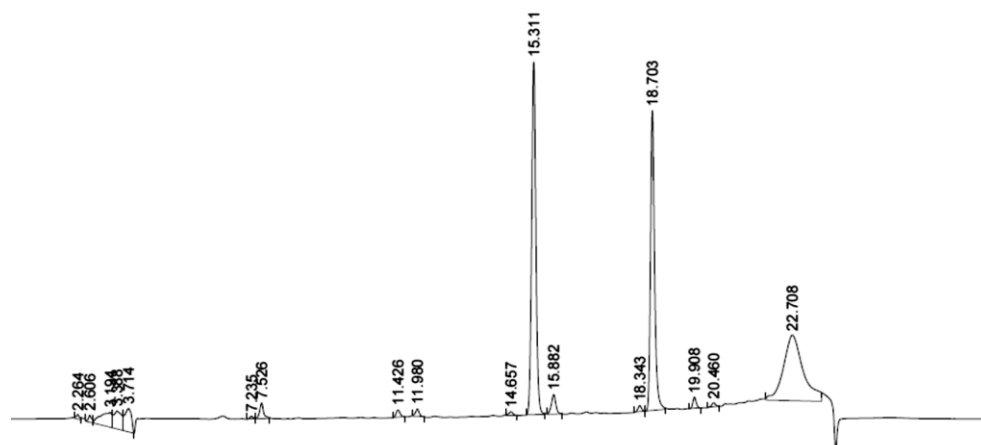
ภาคผนวก จ

HPLC โครมาโตแกรมของ MT จากกระบวนการ Solid phase extraction (SPE)

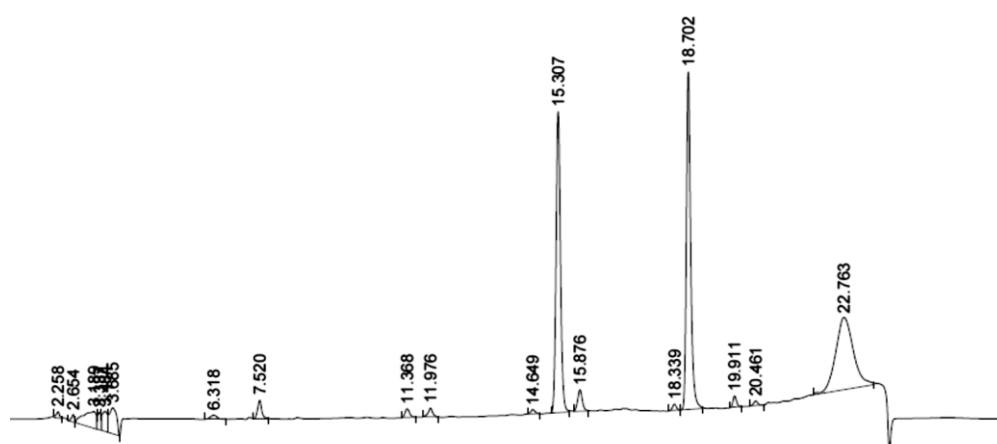


ตารางที่ จ.1 ค่า %recovery จากการวิเคราะห์ MT ด้วยเครื่องวิเคราะห์ HPLC

ชนิดของ cartridge	Area	% Recovery	Average %recovery	SD
C-18	98.90	98.80	98.03	1.03
	91.20	98.70		
	97.32	96.56		
MIF	73.50	73.50	67.91	7.74
	68.40	68.40		
	65.14	61.83		



รูปที่ จ.1 โครมาโตแกรมของ MT (cartridge C-18)



รูปที่ จ.2 โครมาโตแกรมของ MT (cartridge MIF)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพนธ์ภักดิ์ เกิดสมุทร เกิดเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2559

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงาน การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 วันที่ 11-13 พฤษภาคม 2559 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ

