

การดูฉบับแบบคัดเลือกของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูฉบับชนิดคาร์บอนภายใต้การมีอยู่ของ
สารอินทรีย์ธรรมชาติและอออนชนิดต่างๆ



นางสาวมัชฌิมา ทองจีน

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 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Selective adsorption of carbamazepine on carbonaceous adsorbents under the
presence of natural organic matters and ions

Miss Matchima Tongjeen



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับแบบคัดเลือกของคาร์บอนมาซีปีบนตัวกลางดูด
ซับชนิดคาร์บอนภายใต้การมีอยู่ของสารอินทรีย์ธรรมชาติ
และอไอออนชนิดต่างๆ

โดย

นางสาวมัชฌิมา ทองจีน

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่อประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.พนิดา ปรารัตน์)

มัชฌิมา ทองจีน : การดูดซับแบบคัดเลือกของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอนภายใต้การมีอยู่ของสารอินทรีย์ธรรมชาติและไอออนชนิดต่างๆ (Selective adsorption of carbamazepine on carbonaceous adsorbents under the presence of natural organic matters and ions) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 160 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของพีเอช ไอออนต่างๆ สารอินทรีย์ธรรมชาติ และสารตกค้างร่วมจาก ซัลฟามेतอกซาโซล ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน (ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และ กราฟีนออกไซด์) จากผลการวิจัยพบว่า ตัวกลางดูดซับทุกชนิดดูดซับคาร์บามาซีปีนได้อย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก และการดูดซับทั้งหมดเป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 2 เสมือน จากการศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับพบว่าพีเอชที่ศึกษา (6.2 7 และ 8.2) ไม่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ด แต่ไม่สามารถสรุปผลของพีเอชต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนของกราฟีนออกไซด์ได้อย่างแน่ชัด จากการศึกษาการดูดซับคาร์บามาซีปีนภายใต้การมีอยู่ของไอออนชนิดต่างๆพบว่า การมีอยู่ของโมโนวาเลนซ์ไอออน Na^+ และ Cl^- ร่วมกับมลสารตกค้างจากยา ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของยาบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอนลดลง สำหรับไอออน K^+ ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนกราฟีนออกไซด์ลดลง แต่ทำให้การดูดซับคาร์บามาซีปีนบนถ่านกัมมันต์ชนิดผงและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดลดลง ไอออนประจุลบ NO_3^- , CO_3^{2-} นั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนทุกตัวกลางดูดซับลดลง จากการศึกษาพบว่า ไอออน SO_4^{2-} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} เพิ่มการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนกราฟีนออกไซด์ให้สูงขึ้นเป็นอย่างมาก แต่กลับส่งผลให้การดูดซับคาร์บามาซีปีนบนถ่านกัมมันต์ชนิดผงและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ ยังพบว่าสารอินทรีย์ธรรมชาติทำให้การดูดซับคาร์บามาซีปีนบนถ่านกัมมันต์ชนิดผงลดลง แต่กลับเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดอย่างมาก จากการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสมระหว่างคาร์บามาซีปีนและซัลฟามेतอกซาโซล พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ดเลือกที่จะดูดซับคาร์บามาซีปีนมากกว่าซัลฟามेतอกซาโซล ในทางตรงกันข้ามกราฟีนออกไซด์มีเลือกที่จะดูดซับซัลฟามेतอกซาโซลมากกว่าคาร์บามาซีปีน ซึ่งจากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า โมโนวาเลนซ์ ไดวาเลนซ์ สารอินทรีย์ธรรมชาติ และซัลฟามेतอกซาโซล ส่งผลกระทบต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570334021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ADSORPTION / CARBONACEOUS ADSORBENT / NATURAL ORGANIC MATTER / ION / CARBAMAZEPINE

MATCHIMA TONGJEEN: Selective adsorption of carbamazepine on carbonaceous adsorbents under the presence of natural organic matters and ions. ADVISOR: ASSOC. PROF.PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 160 pp.

In this study, The adsorption of carbamazepine (CBZ) onto three carbonaceous adsorbents (powdered activated carbon; PAC, granular active carbon; GAC and graphene oxide; GO) was investigated under co-existing with cations, anions, sulfamethoxazole (SMX) and natural organic matter (NOM). The study of sorption kinetic was found that all studied adsorbents adsorbed CBZ rapidly in first 20 minutes. The adsorption kinetic data obtained were best described by pseudo-second-order kinetic rate model. The impact of pH on adsorption capacity of CBZ was examined at three values of pH (6.2, 7 and 8.2). The sorption capacity of CBZ onto PAC and GAC was not influenced by the pH, but the sorption of CBZ onto GO did not provide sufficient information to distinguish their sorption capacities. The experiment demonstrated that the presence of Na^+ and Cl^- in adsorption of CBZ did not effect on adsorption capacity of CBZ onto carbonaceous adsorbents. Monovalent K^+ did not reduce the sorption capacity of CBZ onto GO, whereas the adsorption of CBZ onto PAC and GAC was affected by the K^+ , NO_3^- , CO_3^{2-} , resulted in the decrease adsorption of CBZ onto all the tested adsorbents. SO_4^{2-} , Mg^{2+} and Ca^{2+} made intense increase in the adsorption CBZ onto GO, whereas the presence of those ions solely caused reduction in adsorption of CBZ onto PAC and GAC. Moreover, NOM decreased the CBZ sorption onto PAC, whereas it greatly enhanced the sorption of CBZ onto GAC. The analysis of co-sorption systems between CBZ and SMX showed that PAC and GAC selectively adsorbed CBZ over SMX. In contrast, GO preferred to adsorb SMX than CBZ. These results suggest that monovalent ions, divalent ions, NOM and sulfamethoxazole are notable factors affecting the adsorption of CBZ onto carbonaceous adsorbents.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยพระคุณของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาแนะนำ ให้คำปรึกษา และถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ และคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อ.ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และ ดร.พนิดา ปรารัตน์ ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอบพระคุณอาจารย์รามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ช่วยสนับสนุนส่งเสริมทางการศึกษาให้แก่ผู้ทำวิจัย จนทำให้การศึกษาสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์	1
1.2 คำสำคัญ (Key word).....	1
1.3 ที่มาและความสำคัญ	1
1.4 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คาร์บามาซีปีน (Carbamazepine; CBZ).....	5
2.1.1 คาร์บามาซีปีนและสมบัติทางเคมีกายภาพ	5
2.1.2 แหล่งที่มาของคาร์บามาซีปีนในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ	7
2.2 ทฤษฎีการดูดซับ	9
2.2.1 กระบวนการดูดซับ (adsorption process).....	10
2.2.2 ประเภทของการดูดซับ	12
2.2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption).....	12
2.2.2.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption).....	12

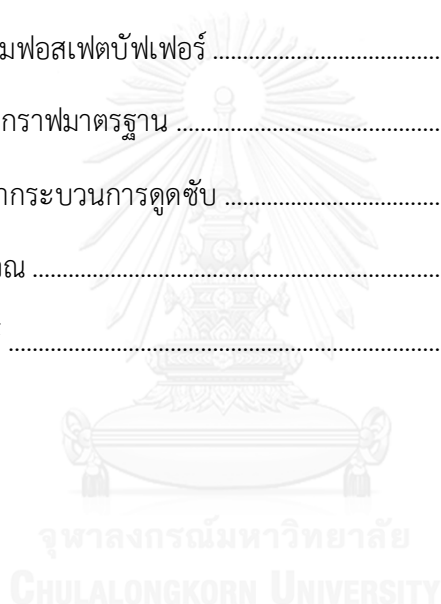
2.2.3 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibria).....	13
2.2.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm).....	14
2.2.4.1 สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)	14
2.2.4.2 สมการไอโซเทอร์มแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer- Emmett-Teller isotherm, BET).....	15
2.2.4.3 สมการไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Fruendlich).....	15
2.2.4.4 สมการแลงเมียร์แบบสัดส่วน	16
2.2.4.5 สมการไอโซเทอร์มแบบ Radke-Praunitz.....	16
2.2.5 ชนิดของไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซจำแนกตามระบบ IUPAC.....	17
2.2.6 ชนิดของตัวดูดซับ	19
2.2.7 ตัวกลางดูดซับกลุ่มคาร์บอน (carbonaceous adsorbent).....	19
2.2.7.1 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon).....	20
2.2.7.2 กราฟีน (graphene)	21
2.2.7.3 กราไฟท์ (graphite)	21
2.2.7.4 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube).....	22
2.2.7.5 ลิกไนต์ (lignite).....	22
2.2.7.6 ไบโอชาร์ (biochar)	23
2.2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	23
2.2.8.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ	23
2.2.8.2 ลักษณะและสมบัติของตัวถูกดูดซับ	24
2.2.8.3 พีเอช (pH) ของสารละลาย	24
2.2.8.4 อุณหภูมิ (temperature)	25
2.2.8.5 ความปั่นป่วน (turbulence).....	25

2.2.8.6 สารรบกวน (interfering substance).....	25
2.3 สารอินทรีย์ธรรมชาติ	25
2.3.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter; NOM)	26
2.3.2 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter; DOM).....	26
2.3.3 หมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิก	27
2.3.4 ลักษณะสมบัติเคมีและกายภาพของกรดฮิวมิก	27
2.3.5 กระบวนการในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ	28
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน	28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการอุบัติขึ้นและความเป็นพิษของคาร์บามาซิปีน	30
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดคาร์บามาซิปีน	32
2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการดูดซับคาร์บามาซิปีน	38
2.5.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแบบคัดเลือก (selectivity)	42
2.5.5 งานวิจัยเกี่ยวกับผลของ ION BRIDGING	45
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย	49
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	49
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	49
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	50
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	51
3.2.1 ตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน	52
3.2.2 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์	52
3.2.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	53
3.2.3.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว.....	53

3.2.3.2 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว	54
3.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของมลสาร	56
3.2.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของมลสาร	56
3.2.5.1 วิธีวัดปริมาณความเข้มข้นของมลสารในระบบดูดซับเชิงเดี่ยว	56
3.2.5.2 วิธีวัดปริมาณความเข้มข้นของมลสารในระบบดูดซับเชิงผสม	57
3.2.6 การศึกษากระบวนการดูดซับเชิงเดี่ยว	59
3.2.6.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนมาซีป็นบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ	59
3.2.6.2 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับมลสารบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ	59
3.2.6.3 ศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนมาซีป็น	60
3.2.7 การศึกษากระบวนการดูดซับเชิงผสม	60
3.2.7.1 ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีป็น	60
3.2.7.2 ผลกระทบของอไอออนต่างๆต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีป็น	61
3.2.7.3 การดูดซับคาร์บอนมาซีป็นร่วมกับสารตกค้างจากยาฆ่าฆ่าแมทอกซาโซล	62
3.2.8 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้	62
3.2.8.1 สมการทางจลนพลศาสตร์	62
3.2.8.2 สมการไอโซเทอร์ม	63
3.2.8.3 สมการทางประสิทธิภาพการคัดแยก	64
3.2.8.4 สมการเกี่ยวกับการแพร่	65
3.2.8.5 สมการการถ่ายเทมวลสาร	66
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลงานวิจัย	70
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	70
4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	70
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว	73

4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของมลสารบนพื้นผิว	74
4.2 ผลการศึกษากระบวนการดูดซับเชิงเดี่ยว	79
4.2.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ	79
4.2.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	82
4.2.2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเดี่ยวของมลสาร	82
4.2.2.2 ผลการศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	87
4.3 ผลการศึกษากระบวนการดูดซับเชิงสารผสม	89
4.3.1 ผลการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีน	89
4.3.2 ผลการศึกษาผลกระทบของอ๊อนต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีน	91
4.3.2.1 ผลกระทบของอ๊อนต่างๆต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบน PAC.....	93
4.3.2.2 ผลกระทบของอ๊อนต่างๆต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบน GAC	95
4.3.2.3 ผลกระทบของอ๊อนต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบน GO.....	97
4.3.3 ผลการศึกษาการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนร่วมกับยาฆ่าฟอสฟอรัสไฮโดรเจน	100
4.3.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX บน PAC.....	101
4.3.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX บน GAC	102
4.3.3.3 ผลการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX บน GO.....	104
4.4 การนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้	107
4.4.1 ออกแบบระบบดูดซับแบบที่ละเท	107
4.4.2 ออกแบบระบบดูดซับแบบคอลัมน์	109
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	111
5.1 สรุปผลการวิจัย	111
5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	111
5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	112

5.1.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเดี่ยวของคาร์บามาซีป็น ซัลฟาเมทอกซาโซล และกรดแทนนิก	112
5.1.4 การศึกษาผลกระทบของ สารอินทรีย์ธรรมชาติ อีออนพื้นฐานต่างๆ ในน้ำ และสาร ตกค้างจากยาซัลฟาเมทอกซาโซลต่อการดูดซับคาร์บามาซีป็น	113
5.2 ข้อเสนอแนะ	113
รายการอ้างอิง	114
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก การเตรียมฟอสเฟตบัพเฟอร์	121
ภาคผนวก ข การสร้างกราฟมาตรฐาน	124
ภาคผนวก ค การศึกษากระบวนการดูดซับ	135
ภาคผนวก ง การคำนวณ	155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	160



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ 6	6
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดบางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ...20	20
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดผงบางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด20	20
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของกราฟีนชนิดแผ่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาด21	21
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของกราฟีนชนิดแผ่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาด21	21
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนชนิด SWCNT และ MWCNT22	22
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของลิกไนท์ (Assani และคณะ, 2014).....22	22
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์บางชนิด (Sherif และคณะ, 2014).....23	23
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของตัวดูดซับ53	53
ตารางที่ 3.2 ค่าดูดกลืนแสงของชุดควบคุมในระบบดูดซับที่ใช้กราฟีนออกไซด์เป็นตัวกลางดูดซับ *56	56
ตารางที่ 3.3 วัตถุประสงค์การศึกษา ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์และการนำไปประยุกต์ใช้69	69
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด73	73
ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของมลสารที่ทำอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....78	78
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนนาโนทิวบ์80	80
ตารางที่ 4.4 อัตราการดูดซับเริ่มต้นและระยะครึ่งชีวิตของ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ80	80
ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับเชิงเดี่ยวมลสารบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ85	85
ตารางที่ 4.6 ปริมาณการใส่ไอออนชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ.....93	93
ตารางที่ 4.7 สรุปผลกระทบของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บอนนาโนทิวบ์บนตัวกลางดูดซับ ..100	100
ตารางที่ 4.8 ค่าประสิทธิภาพการคัดแยกมลสารออกจากสารละลาย ที่ $C_e=0.01C_s$ * 106	106

ตารางที่ 4.9	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากสมการการถ่ายเทมวลสาร	110
ตารางที่ 5.1	สรุปสมบัติสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด	111



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงของยาคาร์บามาซีพีนในร่างกายมนุษย์	7
รูปที่ 2.2 คาร์บามาซีพีนและเมทาบอลิท์ที่ถูกขับออกจากร่างกาย.....	8
รูปที่ 2.3 ปริมาณคาร์บามาซีพีนในแต่ละหน่วยบำบัดน้ำเสีย	9
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ	11
รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซ 6 ประเภท จำแนกตาม IUPAC (Sing, 1982).....	19
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกรดฮิวมิก	28
รูปที่ 3.1 แผนการทดลองในการดำเนินการวิจัย	51
รูปที่ 3.2 สารละลายกราฟีนออกไซด์เข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร	53
รูปที่ 3.3 สภาพความเป็นประจุของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ค่าพีเอชต่างๆ	55
รูปที่ 3.4 โครมาโตแกรมของสารผสมซิลฟามาเทอกราไฟท์และคาร์บามาซีพีนที่แยกโดยคอลัมน์ C18 column (ODS Hypersil, Hewett Packard)	57
รูปที่ 3.5 โครมาโตแกรมของสารผสมซิลฟามาเทอกราไฟท์และคาร์บามาซีพีนที่แยกโดยคอลัมน์ C18 Column (Apollo, Mainz).....	58
รูปที่ 3.6 โครมาโตแกรมของสารผสมกรดแทนนิกและคาร์บามาซีพีนที่แยกโดยคอลัมน์ C18 Column (Apollo 250 x 4.6 mm, 5 µm, Alltech, Mainz)	58
รูปที่ 4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนของตัวกลางดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย	70
รูปที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซ 6 ประเภท จำแนกตาม IUPAC (Sing, 1982).....	71
รูปที่ 4.3 แผนภูมิการกระจายตัวของรูพรุนบน PAC	72
รูปที่ 4.4 แผนภูมิการกระจายตัวของรูพรุนบน GAC.....	72
รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของประจุ (surface charge) บนพื้นผิวดักกลางดูดซับ	73
รูปที่ 4.6 สเปกตรัม IR ของ CBZ ก่อนและหลังถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	75
รูปที่ 4.7 สเปกตรัม IR ของมลสาร SMX ก่อนและหลังถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ	76

รูปที่ 4.8	สเปกตรัม IR ของมลสาร TNC ก่อนและหลังถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.9	จลนพลศาสตร์การดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ	79
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $t^{1/2}$ และความจุการดูดซับของตัวกลางดูดซับ	81
รูปที่ 4.11	โครมาโตแกรมของ Tannic และ GO	83
รูปที่ 4.12	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.13	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ SMX บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.14	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Tannic บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	85
รูปที่ 4.15	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ SMX และ TNC บน PAC.....	86
รูปที่ 4.16	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ SMX และ TNC บน GAC.....	86
รูปที่ 4.17	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ และ SMX บน GO.....	87
รูปที่ 4.18	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน PAC ที่พีเอชต่างๆ	87
รูปที่ 4.19	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน GAC ที่พีเอชต่างๆ.....	88
รูปที่ 4.20	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน GO ที่พีเอชต่างๆ	88
รูปที่ 4.21	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน PAC ในกรณี Single solute (Single CBZ) และ ในกรณีมี Tannic เป็น Competitor (CBZ + TNC).....	89
รูปที่ 4.22	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน GAC ในกรณี Single solute (Single CBZ) และ ในกรณีมี Tannic เป็น Competitor (CBZ + TNC).....	90
รูปที่ 4.23	ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ	92
รูปที่ 4.24	ผลของโมโนวาเลนซ์ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ PAC.....	94
รูปที่ 4.25	ผลของ divalent anion ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ PAC	94
รูปที่ 4.26	ผลของ divalent cation ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ PAC.....	95
รูปที่ 4.27	ผลของโมโนวาเลนซ์ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC	96
รูปที่ 4.28	ผลของ divalent anion ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC	96
รูปที่ 4.29	ผลของ divalent cation ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC	97

รูปที่ 4.30 ผลของโมโนวาเลนซ์ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC	98
รูปที่ 4.31 ผลของ divalent anion ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC.....	98
รูปที่ 4.32 ผลของ divalent cation ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GO.....	99
รูปที่ 4.33 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC..	101
รูปที่ 4.34 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC....	102
รูปที่ 4.35 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC ...	103
รูปที่ 4.36 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC ...	103
รูปที่ 4.37 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GO	105
รูปที่ 4.38 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GO	105
รูปที่ 4.39 ตัวอย่างการออกแบบระบบดูดซับแบบที่ละเท้านั้นตอนเดียว เพื่อบำบัด CBZ ด้วย PAC	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย การดูดซับแบบคัดเลือกของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน ภายใต้การมีอยู่ของสารอินทรีย์ธรรมชาติและไอออนชนิดต่างๆ

ภาษาอังกฤษ Selective adsorption of carbamazepine on carbonaceous adsorbents under the presence of natural organic matters and ions

1.2 คำสำคัญ (Key word)

การดูดซับ	(Adsorption)
ตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน	(Carbonaceous adsorbent)
สารอินทรีย์ธรรมชาติ	(Natural organic matter)
ไอออน	(Ion)
คาร์บามาซีปีน	(Carbamazepine)

1.3 ที่มาและความสำคัญ

ยามีบทบาทสำคัญในการรักษาและการป้องกันโรคทั้งในคนและสัตว์ ซึ่งโครงสร้างโมเลกุล และคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของยาต่างๆ เหล่านี้ถูกออกแบบเพื่อใช้งานอย่างไร้ความบกพร่อง มีผลต่ออวัยวะรับสัมผัสในคนหรือสัตว์ หรือมีความเป็นพิษต่อเชื้อโรค ในทางกลับกันยังอาจมีผลกระทบที่

ไม่คาดคิดต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม และต่อสุขภาพของมนุษย์ ปัจจุบันมีหลักฐานการพบสารประกอบของยาในสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ดิน หรือน้ำบาดาล

แหล่งที่มาและเส้นทางการปนเปื้อนของยาเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมีความเป็นไปได้หลายทาง โรงบำบัดน้ำเสียของชุมชนเป็นอีกหนึ่งแหล่งที่มีการสะสมของยาและปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมผ่านทางน้ำทิ้งและกากตะกอน ในปัจจุบันระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งถูกใช้โดยทั่วไปในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถบำบัดน้ำทิ้งให้มีคุณภาพตามมาตรฐาน ด้วยค่าดำเนินการและบำรุงรักษาที่เหมาะสม (เหมาะสำหรับการปล่อยทิ้งหรือนำมาหมუნเวียนมาใช้อีก) อย่างไรก็ตามการบำบัดประเภทนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถอันจำกัดในการกำจัดยาและสารประกอบที่เกี่ยวข้องออกจากร้างอย่างปลอดภัย

ในปัจจุบัน มีการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำต่างๆ มาใช้กำจัดยาออกจากร้างเสียในระดับห้องปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางกายภาพที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น การบำบัดทางชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรน (Membrane bioreactor; MBR) การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูง หรือแม้กระทั่งนำกระบวนการต่างๆ เหล่านี้มาศึกษาในรูปแบบกระบวนการผสม (hybrid process) เช่น MBR-NF UV-AOP เป็นต้น พบว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการบำบัดยาออกจากร้าง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในบำบัดสูง และไม่ก่อให้เกิดสารพลอยได้ (by-products) ที่มีแนวโน้มจะก่อความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

คาร์บามาซีป็น เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ยาที่พบในโรงบำบัดน้ำและในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีหลักฐานว่าคาร์บามาซีป็นมีความเป็นพิษ และมีแนวโน้มจะเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ (bioaccumulation) เนื่องจากสมบัติความคงทนของมันทำให้เป็นสารตกค้างที่เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงบำบัดน้ำ จึงมีงานวิจัยหลายงานที่ให้ความสำคัญในการบำบัดยาดังนี้ ซึ่งพบว่าการบำบัดคาร์บามาซีป็นมีแนวทางเหมือนยาตัวอื่นๆ นั่นคือถูกกำจัดได้ดีด้วยกระบวนการดูดซับ มีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซีป็นด้วยวัสดุตัวกลางดูดซับหลายๆ ประเภท แต่อย่างไรก็ตามในสถานะน้ำจริงตามธรรมชาติมีมลสารมากมายอยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติและอื้ออนต่างๆ รวมทั้งยาที่เหลือตกค้างอื่นๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับคาร์บามาซีป็นบนตัวกลางดูดซับ มีการศึกษาวิจัยผลกระทบของมลสารดังกล่าวต่อการดูดซับคาร์บามาซีป็นบนตัวกลางดูดซับชนิดซิลิกา แต่ยังไม่มีการวิจัยผลกระทบของสารอินทรีย์และอื้ออนต่างๆ ในน้ำต่อการดูดซับคาร์บามาซีป็นบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน ทั้งนี้ตัวดูดซับชนิดคาร์บอนเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่หลากหลาย งานวิจัยนี้จึงเห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์และอื้ออนต่างๆ ในน้ำต่อการดูดซับคาร์บามาซีป็นบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำตัวกลางดูดซับประเภทนี้ไปใช้ในกระบวนการ

ดูดซับจริงต่อไป โดยตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และกราฟีนชนิดแขวนลอย ซึ่งจะทำการศึกษากลไกการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบนตัวกลางดูดซับคาร์บอน ปัจจัยทางเคมีและกายภาพของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนศาสตร์และความสามารถในการดูดซับ และการดูดซับแบบคัดเลือกภายใต้การมีอยู่ของสารอินทรีย์ อีออนต่างๆ และยาตกค้างอื่นๆ (ซัลฟาเมทอกซาโซล) ร่วมกับคาร์บอนมาซีปีน

1.4 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.4.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนมาซีปีนโดยตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และ กราฟีนออกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยทางเคมีและกายภาพของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ

1.4.2 ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติและอีออนต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

1.4.3 ศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของสารละลายที่มีคาร์บอนมาซีปีนร่วมกับสารตกค้างจากยาซัลฟาเมทอกซาโซล

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 การทดลองดำเนินการในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดยใช้ตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน 3 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และกราฟีนออกไซด์ โดยถ่านกัมมันต์ชนิดผง นำมาจากบริษัท Shirasaki S-10 EnviroChemicals, Ltd. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดนำเข้าจากบริษัท Sigma-Aldrich และตัวดูดซับกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเอง

1.5.2 งานวิจัยนี้ศึกษาปรากฏการณ์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารคาร์บอนมาซีปีนเป็นตัวแทนมลสารจากยา โดยทำการควบคุมความแรงประจุ (ionic strength) พื้นฐาน เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

1.5.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ-เคมีของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของไนโตรเจน ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับคาร์บอนโดยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR) และหาประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับโดยวิธีไทเทรตกรด-เบส

1.5.4 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพ คือ ความเป็นกรด-ด่าง (6.2-8.2) สารละลายที่มีผลต่อการดูดซับของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

1.5.5 ศึกษากลไกการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางชนิดคาร์บอนจากจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับ

1.5.6 ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (กรดแทนนิก) และอ็อกซิเจนพื้นฐานต่างๆ (7 ชนิด) ในน้ำต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

1.5.7 ศึกษาผลกระทบของสารตกค้างจากยาฆ่าฟาเมทอกซาโซลต่อการดูดซับสารคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางชนิดคาร์บอน

1.5.8 สถานที่ทำการวิจัย คือ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพื่อทราบความสามารถในการดูดซับและกลไกการดูดซับของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน รวมถึงผลกระทบของโครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

1.6.2 เพื่อทราบผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติและอ็อกซิเจนต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

1.6.3 เพื่อทราบความสามารถในการดูดซับร่วมของคาร์บามาซีปีนและสารตกค้างจากยาอื่น (ฆ่าฟาเมทอกซาโซล) บนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

1.6.4 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการดูดซับของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอนในสถานะที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของน้ำเสีย

1.6.5 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้สามารถนำไปออกแบบคอลัมน์การดูดซับต่อไปได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บามาซีปีน (Carbamazepine; CBZ)

2.1.1 คาร์บามาซีปีนและสมบัติทางเคมีกายภาพ

คาร์บามาซีปีน เป็นยาด้านอาการชัก (epilepsy) ทำงานโดยการลดกิจกรรมไฟฟ้าที่ผิดปกติในสมอง สามารถนำมาใช้เป็นยาหลักเพียงอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับยาอื่น ๆ ในการรักษาโรค นอกจากนี้ยังใช้ในการรักษาโรคปวดเส้นประสาทใบหน้า (trigeminal neuralgia) รักษาโรคจิตเภท (schizophrenia) เช่น อาการหลงผิดแบบ mania เป็นต้น และถูกใช้เป็นในการรักษาเสถียรภาพของอารมณ์ในโรคอารมณ์สองขั้ว (bipolar disorder) รวมถึงโรคสมาธิสั้น (attention-deficit hyperactivity disorder) (Prajapati และคณะ, 2007)

นอกจากนี้ ยังใช้ในการรักษากลุ่มอาการหลงผิดว่าแขนขายังคงอยู่ (phantom limb syndrome) กลุ่มอาการเจ็บปวดเฉพาะที่แบบซับซ้อน (complex regional pain syndrome) บุคลิกภาพผิดปกติชนิดบอร์เดอร์ไลน์ (borderline personality disorder) ความผิดปกติที่เกิดหลังความเครียดที่สะเทือนใจ (post-traumatic stress disorder) รักษาอาการถอนพิษจากยาเสพติดและสุรา (drug and alcohol withdrawal) รักษาอาการขาอยู่ไม่สุข (restless leg syndrome) และอาการกระตุกในเด็ก (Metcalf และคณะ, 2003)

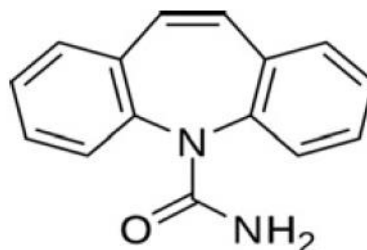
การศึกษาเกี่ยวกับการใช้คาร์บามาซีปีนในหญิงตั้งครรภ์ แสดงให้เห็นว่ามีความเสี่ยงทำให้เกิดการผิดปกติของการพัฒนาการร่างกายทารกในครรภ์ ส่งผลให้เกิดความบกพร่องของกระดูกสันหลัง พัฒนาการระบบประสาทบกพร่อง มีความผิดปกติของหัวใจและหลอดเลือด และพัฒนาการล่าช้า

โดยสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคาร์บามาซีปีน สรุปลงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคาร์บาอะซีน

(Mohapatra และคณะ, 2014) (Domínguez และคณะ, 2011) (Vergili, 2013)

โครงสร้างทางเคมี

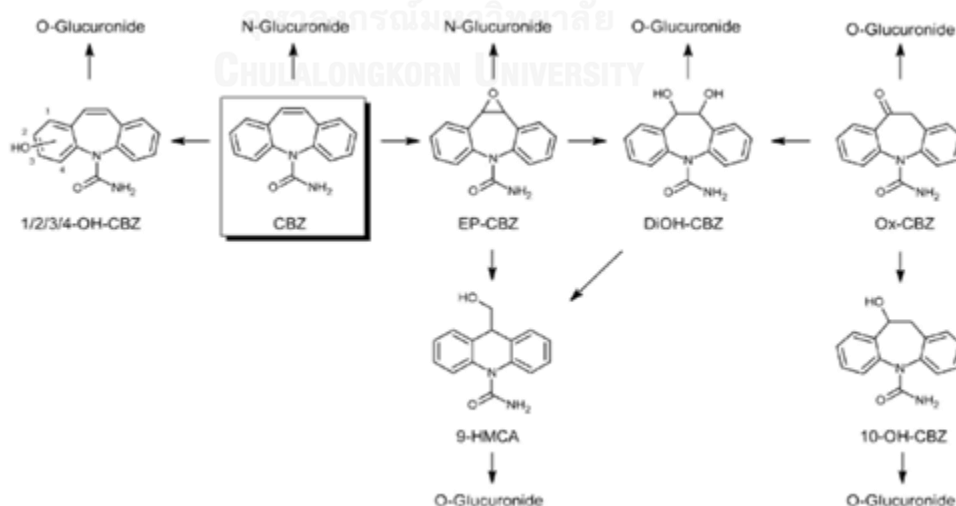


สูตรโมเลกุล	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O	
ชื่อทางเคมี	5H-Dibenz(b,f)azepine-5-carboxamide	
CAS No.	298-46-4	
ชื่อทางการค้า	Antafit (Polipharm) Carbazene (Medifive)	
น้ำหนักโมเลกุล	236.27	กรัมโมล ⁻¹
ค่าการละลายน้ำ	17.7	มิลลิกรัมลิตร ⁻¹ (ที่ 20 องศาเซลเซียส)
Log K _{ow}	2.45	
ค่าคงที่เฮนรี	1.09×10 ⁻⁵	Pa m ³ mol ⁻¹ (ที่ 25 องศาเซลเซียส)
pK _a	13.90	
จุดหลอมเหลว	189 – 193	องศาเซลเซียส
Molar Volume	186.5	cm ³ mol ⁻¹
Molecular Length	1.2	nm
Molecular Width	0.92	nm
Molecular Depth	0.58	nm
Equivalent Width	0.73	nm
Dipole moment	3.943	Debye
Molecular radius	0.319	nm
การใช้งาน	ยาบรรเทาปวด ยากันชัก ยาต้านคลุ้มคลั่ง	

2.1.2 แหล่งที่มาของคาร์บามาซีพีนในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

ปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพของยา (metabolism) ภายหลังจากเข้าสู่ร่างกาย มีหลายปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ปฏิกิริยา conjugation เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 เฟส ได้แก่ 1) เฟสที่หนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) รีดักชัน (reduction) และไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยามีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ มีความชอบน้ำ เพื่อให้ได้เมทาบอลไลท์ที่มีความเป็นขั้วและสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น 2) เฟสที่สองซึ่งจะเปลี่ยนโครงสร้างให้เหมาะสมต่อการขับออกจากร่างกาย ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยา conjugation ซึ่งเป็นการนำโมเลกุลของยา หรือเมทาบอลไลท์ของยาที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาต่างๆ ข้างต้นมาควบคู่ (conjugate) กับสารเคมีในร่างกาย เช่น glucuronic acid, glutathione, sulfate, acetyl และอื่นๆ กลายเป็นเมทาบอลไลท์ในรูปแบบ conjugated ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ปฏิกิริยาทางเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่ต้องอาศัยเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ศูนย์พิษวิทยารามาธิบดี[ออนไลน์]. 2014)

คาร์บามาซีพีนถูกสันดาปอย่างหนักในร่างกายมนุษย์ เมทาบอลไลท์ที่เกิดจากกระบวนการสันดาป (metabolism) กว่า 30 ชนิด ถูกขับออกมาทางปัสสาวะและอุจจาระ จากการศึกษาทางคลินิกเกี่ยวกับคาร์บามาซีพีน พบว่า 72% ของปริมาณทั้งหมดที่ร่างกายรับเข้าไป จะถูกขับออกมาในรูปของปัสสาวะ ส่วนอีก 28% ถูกขับผ่านทางอุจจาระ โดยสารที่ถูกขับออกมานั้นไม่สามารถถูกดูดซับได้ถึงร้อยละ 13 ในปัสสาวะ มีเพียง 1% ของปริมาณยาที่รับเข้าไปเท่านั้นที่อยู่ในรูปคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

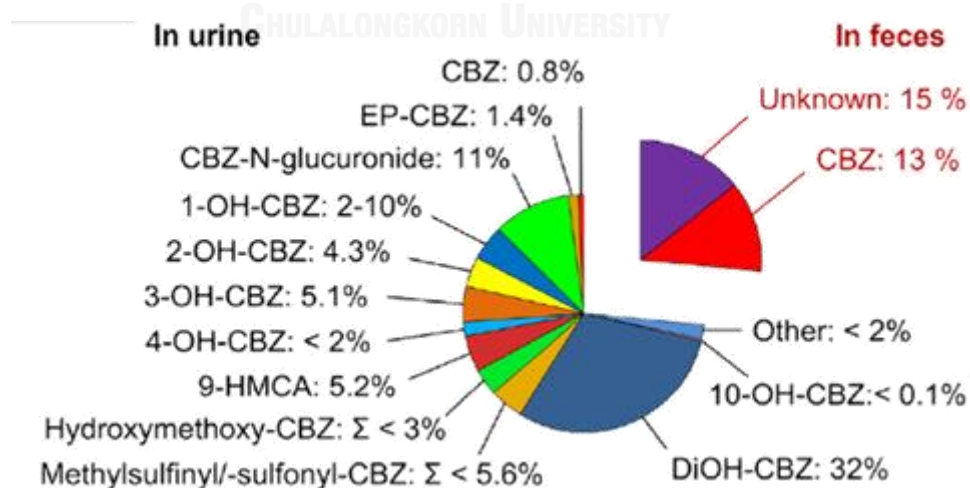


รูปที่ 2.1 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงของยาคาร์บามาซีพีนในร่างกายมนุษย์

(Bahlmann และคณะ, 2014)

สารเมทาบอลไลท์ที่มีมากที่สุดในปีสสาวะเกิดขึ้นจากการแตกตัวของคาร์บามาซิปีน โดยในกระบวนการแรก คาร์บามาซิปีนจะแตกตัวออกเป็น 2 เส้นทาง (รูปที่ 2.1) วิธีทางแรก คาร์บามาซิปีนส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนรูปโดยเอนไซม์ cytochrome P450 (CYP450) เป็น 10,11 epoxy-10,11-dihydro-CBZ (EP-CBZ) (Kerr et al., 1994) ซึ่งต่อมาจะถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ให้อยู่ในรูป 10,11-dihydro-trans-10,11-dihydroxy-CBZ (DiOH-CBZ) ซึ่งทั้ง DiOH-CBZ และ EP-CBZ สามารถเกิดปฏิกิริยากับ 9-hydroxymethyl-10-carbamoylacridan (9-HMCA) ผ่านทาง ring contraction ได้ วิธีทางที่ 2 เกิดจากการย่อยสลายคาร์บามาซิปีนโดยใช้ CYP450 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน แต่ผลผลิตที่ได้นั้นเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการออกซิเดชันสารประกอบฟีนอล ซึ่ง 1-hydroxy-CBZ (1-OH-CBZ), 2-hydroxy-CBZ (2-OH-CBZ) และ 3-hydroxy-CBZ (3-OH-CBZ) เป็นสารประกอบเมทาบอลไลท์ฟีนอลหลักๆที่พบในปีสสาวะ ในขณะที่ 4-hydroxy-CBZ (4-OH-CBZ), 2-hydroxy-1-methoxy-CBZ and 2-hydroxy-3-methoxy-CBZ เป็นสารประกอบที่พบรองลงมา นอกจากนี้การแตกตัวในสองทางหลักนี้พบว่า acridine acridone iminostilbene 2-hydroxyiminostilbene และ 9-acridine-10-carboxaldehyde เป็นสารเมทาบอลไลท์ที่เกิดจากการแตกตัวของคาร์บามาซิปีนในเส้นทางย่อย (Bahlmann และคณะ, 2014)

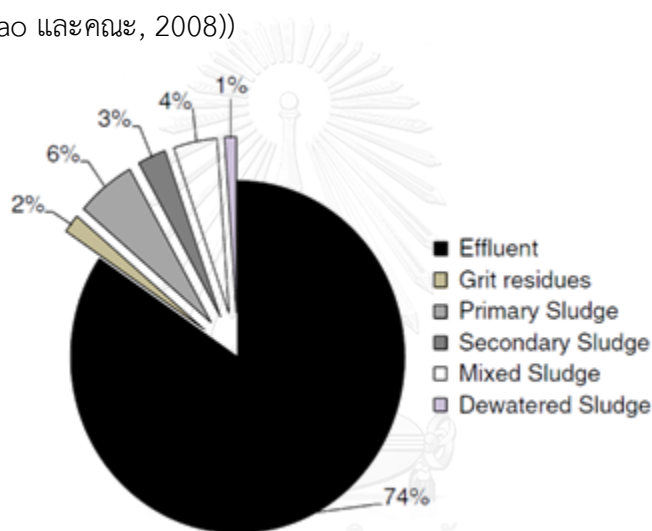
เมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการขั้นที่ 2 CBZ และ EP-CBZ จะถูก functionalized ผ่านทาง carboxamide group ให้อยู่ในรูป N-glucuronides ((Bauer และคณะ, 1976);(Maggs และคณะ, 1997)) ในขณะที่เดียวกันสารเมทาบอลไลท์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxylated metabolites) จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป O-glucuronides (Richter และคณะ, 1978) หรือคอนจูเกตซัลเฟต (sulfate conjugates) (Kriemler และคณะ, 1978)



รูปที่ 2.2 คาร์บามาซิปีนและเมทาบอลไลท์ที่ถูกขับออกจากร่างกาย

(Bahlmann และคณะ, 2014)

หลังจากถูกขับออกมาจากร่างกาย คาร์บามาซีปีนและเมทาบอลไลท์ของมันเข้าสู่โรงบำบัดน้ำเสีย (WWTP) คาร์บามาซีปีนเป็นสารตกค้างยาวนาน และมีการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบตะกอนเร่ง (Celiz และคณะ, 2009) และในงานวิจัยหลายชิ้นพบว่าพบคาร์บามาซีปีนกระจายอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม (น้ำใต้ดิน แม่น้ำ ดิน) ((Clara และคณะ, 2005); (Joss และคณะ, 2005)) ความเข้มข้นของคาร์บามาซีปีนมีค่าแตกต่างกันไปตามโรงบำบัด โดยค่าความเข้มข้นมีตั้งแต่ประมาณหลักร้อยนาโนกรัมต่อลิตรจนถึงระดับไมกีกี่มิลลิกรัมต่อลิตร (Zhang และคณะ, 2008) DiOH-CBZ 2-OH-CBZ 3-OH-CBZ EP-CBZ Ox-CBZ และ 10-OH-CBZ ถูกพบในน้ำเสียหลายประเทศ ซึ่ง DiOH-CBZ 2-OH-CBZ 3-OH-CBZ EP-CBZ และ 10-OH-CBZ เป็นสารที่มีความคงทนสูงในระบบบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับสารเดิม (parent compound) ((Leclercq และคณะ, 2009); (Zhao และคณะ, 2008))



รูปที่ 2.3 ปริมาณคาร์บามาซีปีนในแต่ละหน่วยบำบัดน้ำเสีย

(Mohapatra Brar Tyagi และคณะ, 2014)

หลังจากออกจากโรงบำบัดน้ำเสียแล้ว คาร์บามาซีปีนและเมทาบอลไลท์ของมันมีศักยภาพที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ ในหลายงานวิจัย พบว่า คาร์บามาซีปีนอาจทำให้เกิดสถานะเครียดออกซิเดชันต่อปลาเรนโบว์เทราท์ (Li และคณะ, 2010) และปลาทอง (F. Chen และคณะ, 2012)

2.2 ทฤษฎีการดูดซับ

(ปฎิภาณ, 2014) (เดชา, 2552)

2.2.1 กระบวนการดูดซับ (adsorption process)

การดูดซับ (adsorption) เป็นปรากฏการณ์การสะสมสารหนึ่งชนิดเป็นอย่งน้อย ณ บริเวณผิวร่วม (interface) ระหว่างวัฏภาค (phase) เช่น ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของแข็ง ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของแข็ง ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของเหลว เป็นต้น การสะสมสารดังกล่าวเกิดจากการเคลื่อนย้ายมวลสาร (mass transfer) จากตัวกลางหนึ่งมาติดบนผิวของอีกตัวกลางหนึ่ง โดยสารที่สะสมหรือถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งอาจเป็นสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งอาจเป็นสถานะของเหลว หรือของแข็ง และกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption process)

ในระบบบำบัดน้ำเสียและระบบผลิตน้ำประปา กระบวนการดูดซับมักถูกใช้ในการกำจัดมลสารต่างๆ ในน้ำที่ไม่สามารถถูกกำจัดด้วยกระบวนการทั่วไปได้ เช่น การกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ก่อให้เกิดสี และกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำดิบที่จะนำมาผลิตน้ำประปา เป็นต้น เนื่องจากของแข็งมีพื้นผิวจำเพาะคงตัว ทำให้สามารถกำหนดผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของระบบดูดซับได้อย่างชัดเจน ดังนั้น กระบวนการดูดซับในระบบดังกล่าวจึงมักใช้สารดูดซับในรูปของของแข็ง สารดูดซับที่นิยมได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เบนโทไนต์ (bentonite) เป็นต้น

หากกล่าวถึงกระบวนการดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสียหรือระบบผลิตน้ำประปาทั่วไปสามารถกล่าวได้ว่า การดูดซับดังกล่าวเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารจากวัฏภาคน้ำเข้าสู่พื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่เป็นของแข็ง ทำให้ความเข้มข้นของมลสารเหล่านั้นในน้ำลดลง ซึ่งในการศึกษากระบวนการดูดซับในระบบดังกล่าว มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจถึงปรากฏการณ์การดูดซับบนผิวของแข็งในวัฏภาคน้ำเป็นอย่างดี

กลไกการดูดซับในวัฏภาคน้ำแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) กลไกการแพร่ภายนอก (external diffusion หรือ film diffusion) เป็นการแพร่ของสารถูกดูดซับเข้าสู่ชั้นฟิล์มของตัวดูดซับซึ่งมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยสารถูกดูดซับหรือในที่นี้คือ มลสารจะแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าไปบริเวณผิวหน้าของตัวกลางดูดซับ

2) กลไกการแพร่ภายใน (internal diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนและพื้นที่ผิวที่ว่างบนตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

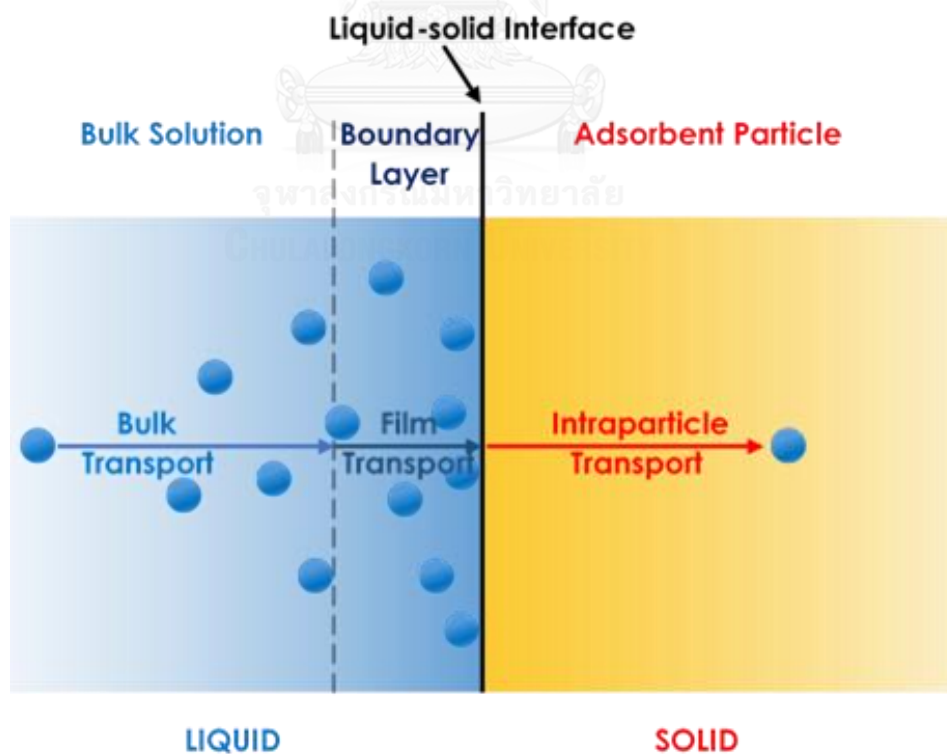
อัตราการเคลื่อนย้ายของสาร (mass transfer rate) มีความสำคัญอย่างมากต่ออัตราการดูดซับ ถ้าอัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเร็วตามไปด้วย อัตราการดูดซับถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานในการเคลื่อนย้ายสารมากที่สุด ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) การขนส่งอนุภาค (bulk transfer) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากของเหลว (bulk solution) ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transfer) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นของเหลวแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าสู่ผิวหน้าของตัวกลางดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) ทำให้เกิดการดูดซับภายในรูพรุน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

4) การดูดซับ (adsorption) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีปฏิสัมพันธ์ (interact) กับผิวของตัวกลางดูดซับทำให้เกิดการดูดซับที่ผิวภายในโพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ สามารถจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวตัวดูดซับ

2.2.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ สามารถจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวตัวดูดซับ ดังนี้

2.2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงทางกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) แรงลอนดอน (London Forces) แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-Dipole Force) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) เป็นต้น การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนออกมาค่อนข้างน้อย และสามารถเกิดการย้อนกลับของกระบวนการได้ (reversible) ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งเป็นผลดีต่อการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดซับเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวตัวดูดซับแล้วโดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน มักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption) ซึ่งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ นั่นคือ จำนวนชั้นจะมากขึ้นเมื่อสารดูดซับที่ละลายในสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น กล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนั้นไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ดูดซับจำเพาะ (site specific)

2.2.2.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและตัวดูดซับ ซึ่งเป็นผลให้ตัวดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลใหม่กลายเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น การดูดซับประเภทนี้ต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับประเภทนี้จึงเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิสูงๆ และปฏิกิริยานี้ไม่สามารถย้อนกลับได้ (irreversible) การ

ฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นไปได้ยาก การดูดซับแบบเคมีนี้เกิดได้บนผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น เรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)

2.2.3 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibria)

การดูดซับในระบบของแข็ง-ของเหลว ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และจะถ่ายโอนไปยังตัวดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ เช่น อุณหภูมิคงที่ เป็นต้น ปฏิกิริยาการนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium) สภาวะในขณะนี้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวจะคงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หากกล่าวในแง่จลนพลศาสตร์ ในช่วงเริ่มต้นกระบวนการดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับบางส่วนจะถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้บนผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลที่เกาะติดผิวตัวดูดซับบางส่วนถูกคายออกมา (desorption) อัตราการคายจะน้อยกว่าอัตราการดูดซับในช่วงต้น เมื่อการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบจะเข้าสู่สมดุลไดนามิก (dynamic equilibrium) สมการการดูดซับแสดงไว้ดังสมการ

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t)V}{m} \quad \text{.....(2.1)}$$

โดยที่ q_t คือ มวลของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับต่อมวลของตัวกลางดูดซับ มีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)

c_0 และ c_t คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น ณ เวลา t ใดๆ ของสารถูกดูดซับ มีหน่วยเป็นมวลต่อปริมาตร (ML^{-1})

V คือ ปริมาตรของสารละลาย มีหน่วยเป็นปริมาตร (L)

m คือ มวลของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นน้ำหนัก (M)

จากสมการข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับมวลสารของตัวดูดซับ ณ จุดสมดุล (q_e) ได้

สมดุลการดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของตัวถูกดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ สมดุลนี้มีลักษณะจำเพาะของแต่ละระบบ จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลของสารถูกดูดซับในตัวดูดซับ (q_e) ความเข้มข้นของสาร

ถูกดูดซับที่คงเหลือสารละลาย ณ จุดสมดุล (C_e) และอุณหภูมิสมดุล (T) ของระบบดูดซับนั้น หากปรากฏการณ์ดูดซับดังกล่าวเกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ณ จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

2.2.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลากหลายได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการอธิบาย ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นในวัฏภาคน้ำ แบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่

2.2.4.1 สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

แบบจำลองเกิดขึ้นจากสมมติฐานที่ว่า 1) การดูดซับเกิดเฉพาะบริเวณผิว ของตัวดูดซับเท่านั้น 2) พลังงานของการดูดซับบนผิวหน้าของตัวดูดซับเท่ากันตลอดทุกตำแหน่งดูดซับ และคงที่ 3) พื้นผิวของตัวดูดซับจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ 4) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มี ปฏิสัมพันธ์ต่อกัน แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวกลางดูดซับเท่านั้น ดังนั้นชั้น การดูดซับที่เกิดขึ้นมีเพียงชั้นเดียว (monolayer) 5) การดูดซับทั้งหมดเกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกัน สามารถเขียนสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ได้ดังสมการ

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{bc_e}{1+bc_e} \quad \dots\dots(2.2)$$

โดยที่ q_e คือ มวลของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำหรือสารละลาย ณ สภาวะ สมดุล มีหน่วยเป็น มวลต่อปริมาตร (ML^{-1})

q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อ น้ำหนัก (M/M)

b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อ มวล ($L M^{-1}$)

2.2.4.2 สมการไอโซเทอร์มแบบบรูนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์

(Brunauer-Emmett-Teller isotherm, BET)

นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และ Paul Emmett และ Edward Teller ได้พัฒนาแบบจำลอง BET จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ บนสมมติฐานที่ว่า พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกัน (uniform) แต่ละตำแหน่งการดูดซับบนพื้นผิวไม่ส่งผลต่อการดูดซับต่อตำแหน่งดูดซับข้างเคียง นอกจากนี้ พลังงานการดูดซับยึดจับชั้นดูดซับชั้นแรกของสารถูกดูดซับ แต่พลังงานของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแล้ว จะทำปฏิกิริยสัมพันธ์กับตัวถูกดูดซับในสารละลายก่อให้เกิดการดูดซับในชั้นถัดไป ก่อให้เกิดเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) สามารถเขียนสมการไอโซเทอร์มแบบ BET ได้ดังสมการ

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{B c_e}{(c_s - c_e) \left[1 + (B - 1) \frac{c_e}{c_s} \right]} \quad \dots\dots(2.3)$$

- โดยที่ q_e คือ มวลของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)
- c_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำหรือสารละลาย ณ สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็น มวลต่อปริมาตร (ML^{-1})
- q_m คือ ความสามารถการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)
- c_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย(ตัวถูกดูดซับ) ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมวลต่อปริมาตร (ML^{-1})
- B คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานของการเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ระหว่างตัวถูกละลาย (ตัวถูกดูดซับ) และพื้นผิวของตัวดูดซับ

2.2.4.3 สมการไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich)

Freundlich ได้พัฒนาสมการเชิงประจักษ์เพื่อใช้อธิบายกระบวนการดูดซับบนสมมติฐานที่ว่า พื้นผิวตัวดูดซับมีความแตกต่างกัน (heterogeneous) ซึ่งประกอบขึ้นด้วยหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายบนพื้นผิวดูดซับ ซึ่งส่งผลพลังงานการดูดซับแต่ละตำแหน่งดูดซับมีค่าต่างกัน Freundlich ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการ

$$q_e = k_F c_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots(2.4)$$

โดยที่ q_e คือ มวลของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล
หน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)

c_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำหรือสารละลาย ณ สภาวะ
สมดุล มีหน่วยเป็นมวลต่อปริมาตร (ML^{-1})

k_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้นของ Freundlich มี
หน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)

$\frac{1}{n}$ คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย ได้จากการทดลอง

2.2.4.4 สมการแลงเมียร์แบบสัดส่วน

สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์เหมาะสำหรับตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิว
แบบ homogeneous แต่ในกรณีที่พื้นผิวของตัวกลางไม่สม่ำเสมอ สามารถประยุกต์ใช้สมการ
ไอโซเทอร์มแลงเมียร์แบบสัดส่วนในการอธิบายการดูดซับ ดังแสดงในสมการ

$$\frac{q_e}{q_m} = \left\{ \frac{(bc_e)^n}{1+(bc_e)^n} \right\}^{\frac{m}{n}} \quad \dots\dots(2.5)$$

โดยที่ q_e คือ มวลของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล
หน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)

c_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำหรือสารละลาย ณ สภาวะ
สมดุล มีหน่วยเป็น มวลต่อปริมาตร (ML^{-1})

q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อ
น้ำหนัก (M/M)

m และ n คือ แสดงถึงลักษณะเฉพาะตัวของความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวตัวดูดซับ

2.2.4.5 สมการไอโซเทอร์มแบบ Radke-Praunitz

เป็นสมการ non-linear มีค่าคงที่ 3 ตัว สามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบาย
การดูดซับในช่วงความเข้มข้นที่กว้างกว่าสมการไอโซเทอร์มแบบค่าคงที่ 2 ตัว ดังแสดง

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{ac_e} + \frac{1}{bc_e^m} \quad \dots\dots(2.6)$$

โดยที่ q_e คือ มวลของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็นน้ำหนักต่อน้ำหนัก (M/M)

c_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำหรือสารละลาย ณ สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็น มวลต่อปริมาตร (ML^{-1})

a b และ c คือ ค่าคงที่

2.2.5 ชนิดของไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซจำแนกตามระบบ IUPAC

(Sing, 1982)

ไอโซเทอร์มการดูดซับในสถานะก๊าซจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวกลางดูดซับเทียบกับความดันย่อยของก๊าซที่เป็นสารที่ถูกดูดซับ หรือ ในรูปความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) โดย P คือ ความดันจริงที่วัดได้ในระบบขณะทำการทดลอง และ P_0 คือ ความดันไออิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิของการดูดซับ ค่าความดันสัมพัทธ์นี้จะมีค่าในช่วง 0 ถึง 1

การจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming and E. Teller หรืออาจเรียก การจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT (Brunauer และคณะ, 1940) และต่อมา Sing ได้เสนอไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซชนิดที่ 6 ในปี ค.ศ. 1982 ดังแสดงในรูปที่ 2.5

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ จุด B (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้

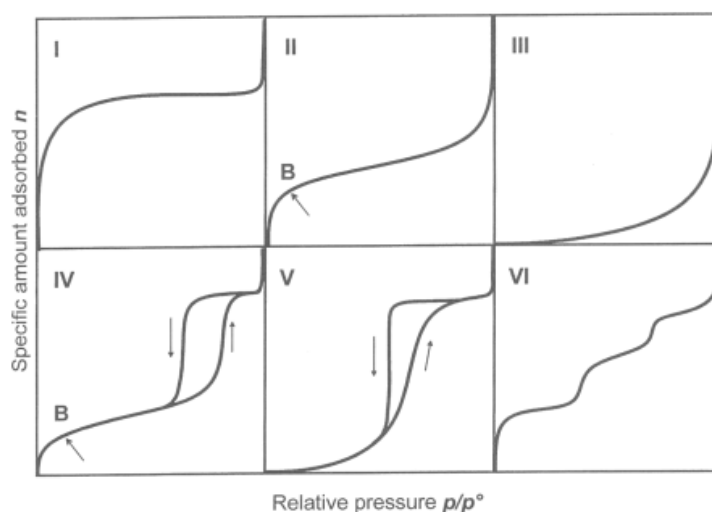
การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่ที่ความดันสัมพัทธ์สูงจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยตัวเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้น เกิดปรากฏการณ์การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกที่มีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นคาปิลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) โดยเกิดจากเส้นกราฟการดูดซับและคายซับไม่ทับกัน เนื่องจากการคายซับเกิดขึ้นได้ยากกว่าการดูดซับ เพราะแรงที่จะทำให้เกิดการคายซับนั้นต้องมากกว่าแรงคาปิลารีที่เกิดจากการควบแน่นในรูพรุนในขั้นตอนการดูดซับ ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงคาปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ได้

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นที่ค่าความดันสัมพัทธ์สูงกว่าเนื่องจากแรงอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบบ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบบ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่การดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับ (uniform surface) และการดูดซับมีความเป็นระเบียบสูง โดยความชันของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซ 6 ประเภท จำแนกตาม IUPAC (Sing, 1982)

2.2.6 ชนิดของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของกระบวนการดูดซับ เนื่องจากกระบวนการดูดซับถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายกระบวนการ เช่น การบำบัดน้ำเสีย การผลิตน้ำประปา การปรับปรุงคุณสมบัติดินในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งมลสารในน้ำและน้ำเสียแต่ละแหล่งที่มา มีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน นักวิจัยจึงมีการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุดูดซับหลากหลายชนิดที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารให้มากขึ้น

ในปัจจุบันมีวัสดุดูดซับมากมายหลายชนิด ซึ่งล้วนแต่มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน ดังนั้น ผู้ออกแบบระบบดูดซับควรมีความรู้ความเข้าใจในการเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีความเหมาะสมกับคุณลักษณะของสารถูกดูดซับ ลักษณะของการใช้งานตัวดูดซับในระบบ นอกจากนี้ยังควรคำนึงถึงความเหมาะสมต่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์ด้วยเช่นกัน

ตัวกลางดูดซับที่นิยมใช้สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม (ปฎิภาณ, 2014) ได้แก่

- 1) ตัวกลางดูดซับกลุ่มคาร์บอน (carbonaceous adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็ก (carbon nanotube) เป็นต้น
- 2) ตัวกลางดูดซับกลุ่มซิลิกา (silica) เช่น ซิลิกาเจล เป็นต้น
- 3) ตัวกลางดูดซับกลุ่มเรซิน

2.2.7 ตัวกลางดูดซับกลุ่มคาร์บอน (carbonaceous adsorbent)

ตัวอย่างตัวกลางดูดซับกลุ่มคาร์บอนในปัจจุบัน มีดังนี้

2.2.7.1 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

เป็นสารอนินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีโครงสร้างรูปอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนไม่เป็นระเบียบ คุณสมบัติหลักของถ่านกัมมันต์ คือ มีรูพรุนสูง และเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวมีความหลากหลายทำให้คุณสมบัติในการดูดซับมลสารสูงขึ้นไปด้วย ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบผง (powder activated carbon, PAC) และแบบเกล็ด (granular activated carbon, GAC)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดบางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Luong และคณะ, 2013)

พารามิเตอร์	GAC-1200
ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density, g/mL)	0.42-0.50
พื้นที่ผิว (MultiPoint BET, m ² /g)	1121
ปริมาณเถ้า (Ash content, %)	3
ค่าไอโอดีน (iodine number, mg of I ₂ /g)	>1200
ขนาดเกล็ด (carbon mesh size)	6 x 12 mesh (1.6-2.0 mm)
ปริมาตรรูพรุน (pore volume, cc/g)	0.043
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (pore diameter, nm)	3.132

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดผงบางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Jing และคณะ, 2014)

พารามิเตอร์	PAC
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กปฐมภูมิ (primary micropore volume, <8°) (cm ³ /g)	0.24
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กทุติยภูมิ (secondary micropore volume, 8° - 20 °) (cm ³ /g)	0.18
ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (mesopore volume, 20° - 500°) (cm ³ /g)	0.07
ขนาดอนุภาค (particle size)(μm)	≤ 40
พื้นที่ผิว (BET surface area) (m ² /g)	763.8
ขนาดรูพรุน (mean pore diameter) (A°)	12.7

2.2.7.2 กราฟีน (graphene)

เป็นวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนแบบหกเหลี่ยมเรียงกันในแนวระนาบ 2 มิติ กราฟีนมีความแข็งแรง ทำให้แผ่นกราฟีนทนต่อการบิดงอ หรือพับได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อโมเลกุล นอกจากนี้กราฟีนยังมีความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะและความสามารถทางการนำไฟฟ้า ดังนั้นกราฟีนจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของกราฟีนชนิดแผ่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
(Qingrong และคณะ, 2014)

พารามิเตอร์	กราฟีน
ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density, g/L)	0.42-0.50
พื้นที่ผิว (BET surface area, m ² /g)	300
ปริมาตรรูพรุน (pore volume, mL/g)	0.123
ขนาดรูพรุน (mean pore diameter, nm)	4.71

2.2.7.3 กราไฟท์ (graphite)

เป็นอีกวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ มีลักษณะบาง ไม่แข็ง และมีความสามารถในการนำไฟฟ้า

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของกราฟไฟท์ชนิดแผ่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
(Eva และคณะ, 2007)

พารามิเตอร์	HSAG-100	HSAG-300
พื้นที่ผิว (BET surface area, m ² /g)	105	312
ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (BJH) (cm ³ /g)	0.26	0.47
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (t-Lippens) (cm ³ /g)	0.008	0.003
ขนาดรูพรุน (average pore radius, nm)	7.8	6.6

2.2.7.4 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube)

ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1991 โดย Sumio Iijima ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับ 1-100 นาโนเมตร โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นสูง สำหรับคุณสมบัติเชิงไฟฟ้า ท่อนาโนคาร์บอน เป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำและตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์ การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อ สัดส่วนองค์ประกอบ และวัตถุดิบอื่นๆที่ผสมลงไป โครงสร้างของท่อสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotube: SWCNT) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube: MWCNT)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนชนิด SWCNT และ MWCNT

(Hyunook และคณะ, 2014)

พารามิเตอร์	SWCNT	MWCNT
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (nm)	~1.5	15 ± 5
ความยาว (μm)	1-5	1-5
พื้นที่ผิว (BET surface area, m ² /g)	1020	235
ขนาดรูพรุน (average pore diameter, nm)	3.5	12

2.2.7.5 ลิกไนต์ (lignite)

เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ น้ำตาลเข้มจนถึงดำ เนื้อแข็ง มีความชื้นต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 55 – 65 ลิกไนต์มีคุณสมบัติที่สามารถเป็นตัวดูดซับได้ ซึ่ง Assani และคณะ (2014) ได้ศึกษาการนำถ่านลิกไนต์ผสมกับกากตะกอนโรงบำบัดน้ำประปาเพื่อทำเป็นสารดูดซับในการบำบัดสีย้อม

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของลิกไนต์ (Assani และคณะ, 2014)

ผลการวิเคราะห์อย่างง่าย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				ผลการวิเคราะห์อย่างละเอียด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)					พื้นที่ผิว (m ² /g)
ความชื้น	ซีไฉ่	สารระเหย	คาร์บอนคงที่	C	H	S	N	O	
4.46	29.64	34.28	31.62	70.86	4.28	4.76	2.2	17.9	38.34

2.2.7.6 ไบโอชาร์ (biochar)

เป็นสารประกอบที่อะตอมคาร์บอนจับกันเป็นวง และจากการศึกษาของ Niggusie และ Kissi ในปี 2011 พบว่า ไบโอชาร์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ค่อนข้างสูง และหมุ่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทำให้ไบโอชาร์มีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับสี และสารปนเปื้อนในน้ำได้

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์บางชนิด (Sherif และคณะ, 2014)

ชนิด	พื้นที่ผิว (BET surface area, m ² /g)	BET-C constant	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (mL/g)	รัศมี (A°)
Rice straw biochar (BRc)	522.5	2.934	1.2004	34–36
Corn stover biochar (BCn)	551.7	2.973	2.6676	37–38
Treated rice straw biochar (BRc)	513.9	2.853	0.6459	34–36
Treated corn stover biochar (BCn)	279.1	2.994	0.3899	33–35

2.2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับในระบบการดูดซับแบบของแข็ง-ของเหลว หรือในสารละลาย มีดังนี้

2.2.8.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

1) พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (surface area) ความสามารถในการดูดซับมักแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ คือ หากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมาก ความสามารถในการดูดซับจะมากตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น หากขนาดของตัวถูกดูดซับหรือมลสารมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้มลสารไม่สามารถเข้าสู่โพรงของตัวกลางดูดซับได้ ทำให้พื้นที่ผิวไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

2) ความพรุนของตัวดูดซับ (porosity) รูพรุนของตัวดูดซับทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น หากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ได้ สำหรับมลสารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนไม่สามารถเข้าไปในรูพรุน และถูกดูดซับบนพื้นผิวภายในได้ และแม้ว่าขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่ามลสาร แต่โครงสร้างภายในรูพรุนมีความซับซ้อน ย่อมส่งผลต่อการแพร่มลสารภายในรูพรุน ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงได้

3) ขนาดของตัวดูดซับ (size) ถ้าตัวกลางดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเร็วในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น อาจกล่าวได้ว่า อัตราเร็วในการดูดซับแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ แต่ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่มีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ที่ใช้ดูดซับมลสารจะเป็นพื้นที่ในรูพรุน การดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในรูพรุน ดังนั้นขนาดของตัวดูดซับประเภทนี้ไม่ส่งผลต่อการดูดซับเท่าใดนัก

4) หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ (surface functional group) หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ตัวดูดซับแต่ละชนิดประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน ไป ส่งผลให้ตัวดูดซับมีลักษณะสมบัติจำเพาะในการคัดเลือกมลสารและอัตราการดูดซับแตกต่างกันตามหมู่ชนิดของฟังก์ชันบนพื้นผิว

2.2.8.2 ลักษณะและสมบัติของตัวถูกดูดซับ

1) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล (molecular weight and size of particle) มลสารที่มีมวลโมเลกุลสูงหรือมีขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ดีกว่ามลสารขนาดเล็กหรือมวลโมเลกุลต่ำ เช่น สารประกอบในกลุ่มแอลกอฮอล์ (alcohols) และ อัลดีไฮด์ (aldehydes) ถูกดูดซับได้มากขึ้น เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายลดลง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการดูดซับด้วยเช่นกัน

2) โครงสร้างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (molecular structure) หมู่ฟังก์ชันต่างๆในโครงสร้างโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีบทบาทอย่างยิ่งต่อการดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group; OH) ส่งเสริมให้มลสารมีความชอบน้ำ สามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้การดูดซับมลสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลโดยผ่านกัมมันต์เกิดได้ยากขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้รูปแบบโครงสร้างของมลสารเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอีกด้วย เช่น โครงสร้างแบบมีกิ่งก้านสาขามีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ดีกว่าแบบเส้นตรง เป็นต้น

2.2.8.3 พีเอช (pH) ของสารละลาย

ผลของความเป็นกรดเบสของสารละลายจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก็ต่อเมื่อ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและมลสารต่างๆในสารละลายสามารถแตกตัว

เป็นประจุได้ เช่น เมื่อสารละลายมีพีเอชต่ำลง มลสารบางชนิดแตกตัวได้มากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจึงต่ำลง เป็นต้น

2.2.8.4 อุณหภูมิ (temperature)

โดยทั่วไปการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้อัตราการแพร่ผ่านของสารถูกดูดซับเข้าภายในรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับพื้นผิวตัวกลางดูดซับลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากโมเลกุลของมลสารที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวดูดซับมีพลังงานสูงขึ้น ทำให้เกิดการสั่นและมีแนวโน้มที่จะหลุดออกจากพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

2.2.8.5 ความปั่นป่วน (turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นกับการขนส่งมลสารของระบบในขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรง ในกรณีที่สารละลายมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของมลสารผ่านฟิล์มเข้าหาตัวกลางดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นกับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ ในทางตรงกันข้ามเมื่อสารละลายมีความปั่นป่วนสูงทำให้ฟิล์มน้ำบางลงจากแรงเฉือนที่רבกวน ทำให้การเคลื่อนที่ของมลสารเข้าหาตัวกลางดูดซับผ่านฟิล์มน้ำได้รวดเร็ว ส่งผลให้การแพร่เข้าสู่โพรงของมลสารเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ

2.2.8.6 สารรบกวน (interfering substance)

กระบวนการดูดซับได้รับอิทธิพลอย่างยิ่งจากความหลากหลายของสารประกอบที่อยู่ในน้ำดิบหรือน้ำเสีย สารประกอบบางชนิดช่วยส่งเสริมการดูดซับ บางชนิดเกิดการดูดซับอย่างอิสระไม่ได้รับอิทธิพลหรือส่งผลต่อสารประกอบตัวอื่น หรือสารประกอบบางชนิดอาจรบกวนการดูดซับของสารประกอบตัวอื่น เช่น การมีอยู่ของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำเสียหรือน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปาที่ใช้ระบบดูดซับถ่านกัมมันต์ โซเดียมคลอไรด์แตกตัวเป็นไอออนไปดูดติดกับโมเลกุลของมลสารที่มีประจุตรงกันข้าม ทำให้มลสารมีความเป็นประจุลดลง ทั้งยังลดแรงผลักระหว่างมลสารลงทำให้การสะสมตัวของมลสารบนถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น (repulsive force)

2.3 สารอินทรีย์ธรรมชาติ

(STEVENSON และคณะ, 1971)

2.3.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter; NOM)

สารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทตามสถานะการละลาย ได้ 2 ส่วน ดังนี้ สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter; DOM) สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (particulate organic matter; POM) แต่หากแบ่งประเภทของ NOM โดยใช้กระดาศกรงที่ขนาดรูพรุนต่างกัน จะสามารถแยกส่วนของสารอินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง DOM และ POM นั่นคือ สารอินทรีย์ประเภทคอลลอยด์ (colloidal organic matter; COM)

2.3.2 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter; DOM)

สารอินทรีย์ละลายน้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สารฮิวมิก (humic substance) และสารที่ไม่ใช่ฮิวมิก (non-humic substance) ในธรรมชาติจะพบสารฮิวมิกมากที่สุด โดยพบมากถึงร้อยละ 50-65 ฮิวมิกจะมีสีเหลืองค่อนข้างน้ำตาล มักพบได้ในตะกอนดินและในแหล่งน้ำธรรมชาติ สารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติความชอบน้ำต่างกัน สารที่ไม่ใช่ฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ชนิดที่มีความชอบน้ำสูง (hydrophilic) ประกอบด้วย hydrophilic acid proteins, amino acids carbohydrate และ carboxylic acids สารฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ชนิดที่มีความชอบน้ำต่ำ (hydrophobic) เมื่อละลายอยู่ในน้ำจะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำ ทำให้เกิดสีที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้โลหะละลายในน้ำได้มากขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคของโรงผลิตน้ำประปาก่อให้เกิดเป็นสาร disinfection by-products (DBPs) เช่น trihalomethanes (THMs) haloacetic acids และสารอื่นๆ ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถแบ่งประเภทสารฮิวมิกตามความสามารถในการละลายภายใต้สภาวะความเป็นกรด-ต่าง ดังนี้

1) กรดฮิวมิก (humic acid) เป็นส่วนของสารฮิวมิกที่ไม่ละลายน้ำภายใต้สภาวะที่น้ำมีค่าพีเอชต่ำกว่า 2 แต่ละลายน้ำได้ที่ค่าพีเอชสูง สามารถถูกสกัดออกจากดินได้ด้วยรีเอเจนต์ต่างๆ กรดฮิวมิกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสารฮิวมิกในดิน มีสีน้ำตาลเข้มสีดำ มี Molecular weight อยู่ระหว่าง 10-300 กิโลดาร์ตัน

2) กรดฟลูวิก (fulvic acid) สามารถละลายน้ำได้ในทุกค่าพีเอช มี Molecular weight อยู่ระหว่าง 10-300 กิโลดาร์ตัน

3) ฮิวมิน (humic) ไม่สามารถละลายน้ำได้ในทุกสภาวะ

2.3.3 หมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิก

1) หมู่คาร์บอกซิล (COOH) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่โมเลกุลฮิวมิกมีสมบัติความเป็นกรด และทำให้กรดฮิวมิกและมีความสามารถดูดซับหรือแลกเปลี่ยนประจุบวก กลุ่มคาร์บอกซิลเหล่านี้จะแตกตัวให้โปรตอน (H^+)

2) หมู่ไฮดรอกซิล กรดฮิวมิกประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลหลายชนิดแต่มี 2 ชนิดหลักคือ

➤ ฟีนอลิกไฮดรอกซิล (phenolic OH) คือกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ที่อยู่ในโครงสร้างอโรมาติก

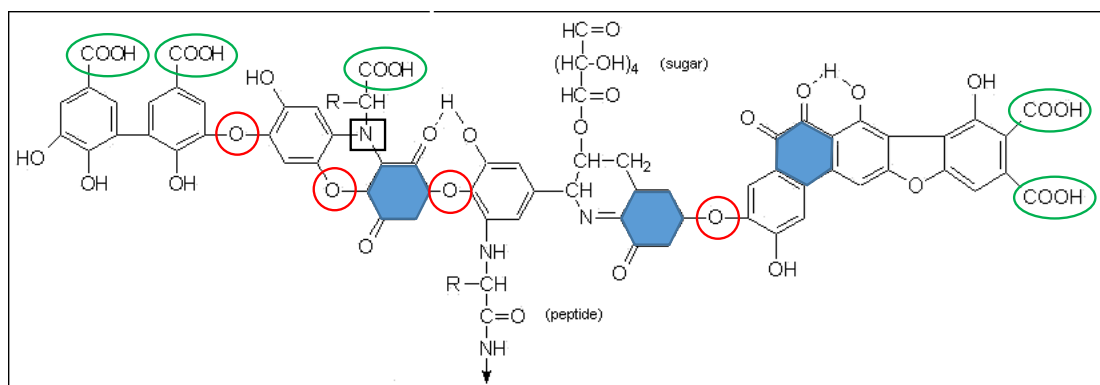
➤ แอลกอฮอล์ไฮดรอกซิล (alcoholic OH) คือกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ที่มีความสัมพันธ์กับหมู่แอลกอฮอล์ หรือคาร์บอนที่ไม่ใช่อโรมาติก

2.3.4 ลักษณะสมบัติเคมีและกายภาพของกรดฮิวมิก

1) ความเป็นกรดรวม (Total acidity) ความเป็นกรดรวมของกรดฮิวมิกจะสัมพันธ์กับชนิดและปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน สามารถใช้เป็นดัชนีวัดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของกรดฮิวมิก

2) โครงสร้างโมเลกุล กรดฮิวมิกมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม เช่น กรดฮิวมิกที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนมากกว่าจะมีหมู่ฟังก์ชันมากกว่าอย่างใดก็ตาม ถ้ากรดฮิวมิกที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนประกอบอยู่มากจะทำให้โครงสร้างนั้นมีความเป็นกรดมาก และเกิดการรวมตัวกับไอออนของโลหะได้ดี

Stevenson อภิปรายว่า สูตรโครงสร้างของกรดฮิวมิกขึ้นกับองค์ประกอบของอโรมาติกหรือฟีนอล รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างสมบัติของกรดฮิวมิกซึ่งประกอบด้วยกลุ่มฟีนอลิก-ไฮดรอกซี ที่อยู่อย่างอิสระและจับเป็นพันธะกันอยู่ โครงสร้างควิโนน ไนโตรเจน และออกซิเจนที่เชื่อมพันธะ และกลุ่มคาร์บอกซิล (COOH) บนวงแหวนอโรมาติก



ควิโนน



ออกซิเจนที่เชื่อมพันธะ



ไนโตรเจนที่เชื่อมพันธะ



คาร์บอกซิลิก

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกรดฮิวมิก

(STEVENSON และคณะ, 1971)

2.3.5 กระบวนการในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ

กระบวนการที่นิยมใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) การกรองผ่านเยื่อเมมเบรน (membrane filtration) การโคแอกกูเลชัน และการฟลอคกูเลชัน (coagulation and flocculation) ซึ่งในปัจจุบันมีการนำกระบวนการต่างๆ มาใช้ในการลดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติ ก่อนเข้าสู่ระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) เป็นต้น

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน

(USEPA[online], 2014)

สัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (partition coefficient) หรือ K เป็นค่าคงที่ซึ่งบ่งชี้ให้ทราบว่า สารที่สนใจละลายในตัวทำละลายคู่หนึ่งๆมากน้อยเพียงใด ณ ภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ ยกตัวอย่างเช่น K_{ow} เป็นค่าคงที่บอกปริมาณความเข้มข้นของสารที่สนใจที่ละลายในออกทานอล (octanal) ต่อปริมาณความเข้มข้นที่ละลายในน้ำ หากสาร A มีค่า K_{ow} สูง แสดงว่า สาร A มีความชอบที่จะอยู่ในออกทานอลมากกว่าอยู่ในน้ำ เป็นต้น ทั้งนี้ หลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้กับตัวกลางที่เราสนใจ

วิธีที่ง่ายและพบบ่อยที่สุดในการประเมินการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในธรรมชาติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน หรือ สัมประสิทธิ์การกระจาย (K_d) พารามิเตอร์ K_d เกี่ยวข้องกับการแบ่งส่วนของสารปนเปื้อนระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคของเหลว (โดยส่วนมาก คือ น้ำ) ค่านี้เป็นค่าที่วัดได้จากการทดลอง สามารถใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของมลสารทางเคมีและกายภาพที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ มากมาย วิธีการทั่วไปที่ใช้วัดค่า K_d มีดังนี้ วิธีทดลองระดับห้องปฏิบัติการแบบทีละเท (laboratory batch method) วิธีการวัดที่แหล่งกำเนิด (in-situ batch method) วิธีทดลองระดับห้องปฏิบัติการแบบคอลัมน์ (laboratory flow-through (or column) method) วิธีการสร้างแบบจำลอง (field modeling method) และวิธี K_{oc} ในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน เป็นที่แน่นอนว่ามีสมมติฐานในการคำนวณค่า K_d ในแต่ละวิธีแตกต่างกัน ซึ่งทำให้ค่า K_d ที่วัดด้วยวิธีต่างกันจะมีค่าที่ต่างกันด้วย

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (K_d) เป็นอัตราส่วนของปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับต่อมวลของของแข็งกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ จุดสมดุล สำหรับปฏิกิริยา



สมการในการหาค่า K_d คือ

$$K_d = \frac{\text{มวลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ}}{\text{มวลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสารละลาย}} = \frac{A_i}{C_i} \quad \text{.....(2.8)}$$

โดยที่ A คือ พื้นผิวการดูดซับที่ว่าง (free or unoccupied surface adsorption sites)

C_i คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ละลายในสารละลาย ณ จุดสมดุล (total dissolved adsorbate remaining in solution at equilibrium)

A_i คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ ณ จุดสมดุล (amount of adsorbate on the solid at equilibrium)

K_d มีหน่วยเป็นมวลต่อมวล M/M

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอุบัติขึ้นและความเป็นพิษของคาร์บามาซีปีน

Jurado และคณะ (2014) ศึกษาการปนเปื้อนคาร์บามาซีปีน (carbamazepine; CBZ) และเมทาบอลิท์ทั้ง 5 ชนิด ในชั้นดินอุ้มน้ำเขตเมือง Barcelona ผู้ศึกษาเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินมาจากชั้นหินอุ้มน้ำของ Poble Sec และ Besos River Delta ในเดือนพฤษภาคม ปี 2010 ทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน (Eh) และปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ณ พื้นที่เก็บตัวอย่าง เก็บน้ำตัวอย่างด้วยขวด PET และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจนกว่าจะทำการวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์มลสารด้วยวิธี Solid Phase Extraction-Liquid Chromatography Electrospray-Tandem Mass Spectrometry (SPE-LC-ESI-MS/MS) โดยวิธีการดังกล่าว ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือสามารถวัดสารที่มีปริมาณความเข้มข้นในช่วง 0.3 - 500 นาโนกรัมต่อลิตรได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จากการศึกษาพบว่า ชั้นดินอุ้มน้ำของ Besos River Delta มีมลสารหลากหลายชนิดและพบในความเข้มข้นของมลสารสูงกว่าชั้นดินอุ้มน้ำของ Poble sec โดยมีสารและปริมาณสารที่ตรวจพบ ดังนี้ $CBZ > 2-OH-CBZ > ACRON > CBZ-EP > ACRIN$ โดย CBZ ถูกพบในทุกตัวอย่างน้ำ และมีปริมาณอยู่ในช่วง 92.2 - 136 นาโนกรัมต่อลิตร 3-OH-CBZ 2-OH-CBZ และ CBZ-EP มีความถี่ในการตรวจพบ 85% 92% และ 69% ตามลำดับ ซึ่ง 3-OH-CBZ และ 2-OH-CBZ ถูกพบในส่วนที่ตื้นของชั้นดินใกล้แม่น้ำ ACRON ถูกพบในความเข้มข้นต่ำๆ เฉลี่ย 3 นาโนกรัมต่อลิตร ACRIN ถูกพบในปริมาณที่น้อยมากหรือแทบจะไม่พบเลย สำหรับชั้นดินอุ้มน้ำ Poble Sec ตรวจไม่พบ 3-OH-CBZ และ 2-OH-CBZ แต่พบ CBZ โดยส่วนใหญ่ ความถี่ในการตรวจพบ (detection frequency) เท่ากับ 92% ส่วนสารประกอบ CBZ-EP Acrin และ Acron ถูกพบน้อยกว่า 25% ของจำนวนตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของ CBZ สัมพันธ์กับความเข้มข้นของ Boron ในชั้นดินอุ้มน้ำ Poble เป็นที่น่าสนใจว่าปริมาณ CBZ และเมทาบอลิท์ที่ถูกพบในน้ำเขต Poble มีปริมาณที่สูง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารดังกล่าวในชั้นใต้ดินมีปริมาณต่ำ ผู้ศึกษาได้สันนิษฐานว่า มลสารเหล่านี้ อาจถูกกำจัดด้วยกระบวนการทางธรรมชาติในชั้น unsaturated zone

Bahlmann และคณะ (2014) ศึกษาการอุบัติขึ้นของคาร์บามาซีปีน (carbamazepine; CBZ) และเมทาบอลิท์ในน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเยอรมันและโปรตุเกส เก็บน้ำตัวอย่างมาจากน้ำขาเข้าและขาออกจากโรงบำบัดน้ำเสีย 6 แห่งในเยอรมัน และ 2 แห่งในโปรตุเกส ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Solid Phase Extraction-LC-MS/MS พบว่า DiOH-CBZ 10-OH-CBZ EP-CBZ 2-OH-CBZ 3-OH-CBZ และ 4-OH-CBZ เป็นสารตกค้างและไม่ถูกกำจัด

ด้วยการบำบัดน้ำเสีย หรือกำจัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบ Oxcarbamazepine และ เมทาบอลไลท์ ได้แก่ 9-OH-10-CBZ 1-OH-CBZ 4-OH-CBZ อีกด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อัตราการ กำจัดระหว่าง DiOH-CBZ 1/2/3OH-CBZ กับ CBZ EP-CBZ ต่างกัน เป็นที่น่าสังเกตว่า มลสารทั้งสองกลุ่มมีหมู่ glucoronides ที่แตกต่างกัน โดย DiOH-CBZ และ 1/2/3OH-CBZ มีหมู่ O-glucoronides ส่วน DiOH-CBZ และ 1/2/3OH-CBZ มีหมู่ N-glucoronides ซึ่งจุลินทรีย์ *Escherichia coli* ในอุจจาระสามารถย่อยสลายคาร์บาามาซิปีนที่มีหมู่ O-glucoronides ได้บางส่วน

Vernouillet และคณะ (2010) ศึกษาพิษและการสะสมในสิ่งมีชีวิตของคาร์บา- มาซิปีน (carbamazepine; CBZ) โดยตัวชี้วัดทางชีวภาพ (biomarker) ซึ่งตรวจวัดในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในห่วงโซ่อาหาร ทำการตรวจสอบการสะสมทางชีวภาพและความเป็นพิษของ CBZ ด้วยวิธี Liquid- chromatography tandem Mass spectrometry พบว่า CBZ มีค่าคงที่การสะสม (bioaccumulation factors) เท่ากับ 2.2 และ 12.6 ในสาหร่าย *P. subcapitata* และสัตว์ เปลือกแข็ง *T. platyurus* ตามลำดับ แต่ไม่มีการสะสมใน *H. attenuata* CBZ กระตุ้นการทำงานของ เอนไซม์ฮีโมออกซิเดส (heme oxidase) และเอนไซม์ glutathione-s-transferase แต่ยับยั้งการ ทำงานของเอนไซม์ Cytochrome P450 สำหรับ *T. platyurus* นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดปฏิกิริยา ระหว่างไขมันกับออกซิเจนในร่างกาย (Lipid Peroxidation) ของ *T. platyurus* และ *H. attenuata* ลดลง ผู้ศึกษาคาดว่าน่าจะมาจาก CBZ มีความชอบไขมันมากกว่าน้ำ การศึกษานี้ใช้ CBZ ความ เข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อทำการทดลอง ซึ่งไม่ใช่ความเข้มข้นที่พบในธรรมชาติ แต่เนื่องจาก ผู้ศึกษาสนใจความสามารถของ CBZ ที่จะสะสมในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) และการปนเปื้อน ของแหล่งอาหารในระยะยาว

Aguirre-Martinez และคณะ (2014) ศึกษาผลของคาร์เฟอีน (caffeine; CAF) ไอบู โพรเฟน (ibuprofen; IBU) คาร์บาามาซิปีน (carbamazepine; CBZ) นูโวไบโอซิน (nuvobiocin; NOV) ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทำการศึกษา 4 ด้านด้วยกัน ดังนี้ ศึกษาการยับยั้งการเรืองแสงของ สิ่งมีชีวิต (bioluminescence inhibition) ทดสอบกับ *V. fischeri* ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ของ CAF IBU CBZ และ NOV ในช่วง 0 – 18000 มิลลิกรัมต่อลิตร บ่มที่ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 และ 15 นาที ทำการวัดความเข้มของแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรียด้วยวิธี OECD ดูค่าความ เข้มข้นของมลสารที่ทำให้เกิดการยับยั้งการเรืองแสง 50 % ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโต (growth inhibition) ทดสอบกับ จุลสาหร่ายทะเลเซลล์เดียว *I. Galbana* และสาหร่ายน้ำจืดเซลล์เดียว *P. Subcapitata* ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CAF IBU CBZ และ NOV ในช่วง 0.00005 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการวัดด้วยวิธี OECD ทุกวันจนครบ 96 ชั่วโมง ศึกษาความเป็นพิษต่อ

เม่นทะเล (sea urchin toxicity test) โดยพิจารณาจากอัตราสมพันธุ์ และการพัฒนาจากเอมบริโอเป็นตัวอ่อนของเม่นทะเล *P. Lividus* จากการศึกษาพบว่า CBZ ไม่ก่อให้เกิดการยับยั้งการเรียงแสงของ *V. fischeri* และไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายทะเลเซลล์เดียว *I. Galbana* และสาหร่ายน้ำจืดเซลล์เดียว *P. Subcapitata* แต่ CBZ ที่ความเข้มข้น 0.00001 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลต่อการพัฒนาจากเอมบริโอเป็นตัวอ่อนของเม่นทะเล *P. Subcapitata* อย่างมีนัยสำคัญ

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดคาร์บามาซิปีน

Hai และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดคาร์บามาซิปีน (carbamazepine; CBZ) และซัลฟามทอกซาโซล (sulfamethoxazole; SMX) โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเยื่อกรอง (MBR) ภายใต้สภาวะไกล์ anoxic และสภาวะ aerobic การทดลองนี้แบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็น 2 ระบบ ระบบแรกรักษาระดับออกซิเจนละลาย (DO) ที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการแปลงระยะเวลาเก็บกักน้ำ (hydraulic retention time) เป็น 24 ชม. และ 50 วัน ระบบที่สองควบคุมออกซิเจนละลาย (DO) ให้อยู่ที่ระดับที่มากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาเก็บกักน้ำ (hydraulic retention time) 30 วัน ซึ่งทั้งสองระบบ ใช้ถัง MBR ที่ทำการทดลองขนาดระดับห้องปฏิบัติการ ใช้หัวเชื้อตะกอนเร่งจากห้องปฏิบัติการอื่นที่มีการดำเนินการมากกว่า 3 ปี ทั้งนี้ ถังปฏิกรณ์ทั้งหมด ถูกควบคุมระบบให้ดำเนินการภายใต้ อุณหภูมิ 22 ± 2 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชของระบบ 7.8 ± 0.1 และ MLSS 10.5 ± 1 กรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นตั้งต้นของมลสารแต่ละตัวอยู่ที่ 750 ไมโครกรัมต่อลิตร และไม่ทิ้งตะกอนเร่งในระหว่างการดำเนินระบบ ถังควบคุมเป็นถังที่ประกอบด้วยมลสารและหัวเชื้อตะกอนเร่งที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วย autoclave แล้ว เมื่อถึงระยะเวลาเก็บกักน้ำที่กำหนด นำน้ำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของมลสารที่เหลือด้วยวิธี HPLC จากนั้นหาประสิทธิภาพการกำจัดมลสาร วิเคราะห์การดูดซับมลสารบนตะกอนด้วยการนำเอากากตะกอนมากำจัดน้ำออก และวัดปริมาณมลสารบนกากตะกอน วิเคราะห์ MLSS ด้วยวิธีมาตรฐาน นอกจากนี้วิเคราะห์หาคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ด้วยวิธีการ TOC/TN- V_{CSH} จากการทดลองพบว่า มีการดูดซับมลสารบนกากตะกอนเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณการบำบัดโดยรวม การย่อยสลายทางชีวภาพของ CBZ พบในถังที่มีระบบไกล์เคียง anoxic เท่านั้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด 68% และในถังแบบ aerobic มีประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 12% แต่ในขณะเดียวกัน การย่อยสลายทางชีวภาพของ SMX เกิดขึ้นทั้งสองระบบ และมีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย 65% ซึ่งทำให้ทราบว่า DO ไม่มีผลต่อการบำบัด SMX เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ TOC/TN ของระบบทั้งสองแบบ พบว่ามีอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน ผู้ทำการศึกษายังแนะนำให้ใช้กระบวนการบำบัดด้วยถัง MBR ภายใต้สภาวะไกล์ anoxic เนื่องจากใช้

พลังงานในการเดินระบบน้อยกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่า น้ำเสียที่มีแต่มลสารเพียงอย่างเดียว ไม่มีสารอินทรีย์อื่นๆ เจือปนมีอัตราเร็วในการบำบัดมลสารเร็วกว่าระบบที่มีสารอินทรีย์ประกอบอยู่ด้วย

Rao และคณะ (2014) ศึกษาการย่อยสลายคาร์บามาซีป็น (carbamazepine; CBZ) ด้วยกระบวนการเพอร์ซัลเฟตแบบเร่ง (Fe(II)-activated persulfate process) ทำการทดลองด้วยถังปฏิกริยาแบบทีละเท (batch) ขนาด 250 มิลลิลิตร วิเคราะห์ความเข้มข้นของคาร์บามาซีป็นในระบบด้วยวิธี HPLC ทำการวิเคราะห์สาร intermediate ที่เกิดขึ้นด้วยวิธี LC-ESI-MS/MS และ SPME/GC/ME ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกริยา โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{2+} $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ อย่างละ 0.25 มิลลิโมลาร์ และ CBZ เท่ากับ 0.025 มิลลิโมลาร์ พบว่ามีกระบวนการในการกำจัด CBZ แบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกเป็นปฏิกริยาการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟต (sulfate radicals; $\text{SO}_4^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ชั้นที่สองเป็นการทำปฏิกริยากันของ CBZ และ $\text{SO}_4^{\cdot-}$ แต่ในชั้นนี้เกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากมีสาร intermediate เกิดขึ้นระหว่างปฏิกริยาและแข่งกับ CBZ ทำปฏิกริยากับ $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ศึกษาผลของพีเอช (pH) ต่อการย่อยสลายคาร์บามาซีป็น โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเหมือนกับการศึกษาจลนพลศาสตร์ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบ ในช่วง 2.00 - 7.87 พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ pH = 3 ศึกษาผลของความเข้มข้น Potassiumperoxydisulfate ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ต่อการย่อยสลายคาร์บามาซีป็น โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{2+} 0.25 มิลลิโมลาร์ และ CBZ เท่ากับ 0.025 มิลลิโมลาร์ ควบคุม pH = 3 แล้วเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ต่อ Fe^{2+} ตั้งแต่ 1:2 ถึง 6:1 ทำการสังเกตเป็นเวลา 40 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้นจาก 1:2 เป็น 4:1 ประสิทธิภาพการกำจัด CBZ เพิ่มขึ้นจาก 41% เป็น 78% ศึกษาผลของความเข้มข้น Fe^{2+} ต่อการย่อยสลายคาร์บามาซีป็น โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1 มิลลิโมลาร์ และ CBZ เท่ากับ 0.025 มิลลิโมลาร์ ควบคุม pH = 3 แล้วเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Fe^{2+} ต่อ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ตั้งแต่ 40:5 ถึง 40:30 ทำการสังเกตเป็นเวลา 40 นาที พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 40:5 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด CBZ มากกว่า Fe^{2+} โดยพบว่าสัดส่วนเชิงโมล CBZ: Fe^{2+} : $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ = 1:5:40 มีความเหมาะสมที่สุด ศึกษาผลสารอินทรีย์ที่มีประจุลบต่อการกำจัด CBZ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยสารอินทรีย์ประจุลบที่ศึกษา ได้แก่ NO_3^- SO_4^{2-} และ H_2PO_4^- พบว่า ทั้งไอออนทั้งสามส่งผลด้านลบต่อการกำจัด CBZ เรียงจากผลกระทบน้อยไปมากตามลำดับ $\text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{H}_2\text{PO}_4^-$ ทั้งนี้ เมื่อศึกษาสาร intermediate ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลาย CBZ ในระบบที่มี Cl^- และไม่มี Cl^- พบว่า Cl^- เร่งการย่อยสลาย CBZ อย่างน่าสนใจ ความเข้มข้นของ Cl^- ยิ่งมาก อัตราการย่อยสลาย CBZ ยิ่งเร็วขึ้น สรุปได้ว่ากระบวนการเพอร์ซัลเฟตแบบเร่ง (Fe(II)-activated persulfate process) มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บามาซีป็น (CBZ)

Mohapatra และคณะ (2014) ศึกษาปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง (Photocatalytic degradation) ของคาร์บามาซีป็นในน้ำเสียโดยใช้ผลึกนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ในการทดลองนี้ใช้ผลึกนาโนที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและที่มีขายในท้องตลาดมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ผลึกนาโนที่ใช้ ได้แก่ commercial TiO_2 , TiO_2 whey- TiO_2 , commercial ZnO , ZnO และ whey- ZnO และนำผลึกนาโนมาวิเคราะห์หาสมบัติพื้นฐาน ศึกษาปฏิกิริยาการย่อยสลายคาร์บามาซีป็นด้วยแสง ด้วยการทดลองในห้องมืด เพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงแดด ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบทีละเท (batch) ขนาด $16.51 \times 12.70 \times 11.43$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้ความเข้มแสง (light intensity) 6.9 mW/cm^2 ที่มีความยาวคลื่น (λ_{max}) เท่ากับ 254 และใช้ผลึกนาโนที่ทำการ sonicated แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายคาร์บามาซีป็นในน้ำตัวอย่างซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 295 ngL^{-1} กักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 120 นาที และควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส น้ำตัวอย่างที่นำมาทำการทดลองนำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียที่เมือง Quebec ประเทศแคนาดา ซึ่งผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ $121 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ก่อนจะนำมาทดลอง เมื่อครบเวลาเก็บกักน้ำนำสารละลายมากรอง และทำการวัดความเข้มข้นของคาร์บามาซีป็นด้วยวิธี LDTD-APCL-MS/MS ผลการศึกษาพบว่า ปฏิกิริยาของแสงนี้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์หรือสังกะสีออกไซด์สามารถย่อยสลายสารคาร์บามาซีป็นได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บามาซีป็นของ commercial TiO_2 , TiO_2 และ whey- TiO_2 เท่ากับ 65% 46% และ 100% ตามลำดับ ในกรณีที่ใช้ whey- TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ปฏิกิริยาสิ้นสุดเมื่อเวลา 55 นาที สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาสังกะสีออกไซด์ พบว่า whey- ZnO มีประสิทธิภาพการกำจัดมากที่สุด สูงถึง 92% ตามด้วย commercial ZnO (61%) และ ZnO (41%) ทั้งนี้ พบว่าการสังเคราะห์ผลึกนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ ด้วยวิธี whey-stabilized ทำให้มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ที่แรงกว่าผลึกนาโนที่ขายตามท้องตลาด ซึ่งจากการทดลอง whey- TiO_2 เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่า whey- ZnO นอกจากนี้มีการตรวจพบ by-product ของคาร์บามาซีป็น ทั้งปฏิกิริยาที่ใช้ TiO_2 และ ZnO เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งสารดังกล่าว คือ epoxy-carbamazepine และ hydroxy-carbamazepine และพบที่เวลากัก 2.9 และ 5.1 นาที ตามลำดับ

Vergili (2013) ศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนชนิดนาโน (nanofiltration) ในการกำจัดคาร์บามาซีป็น (carbamazepine; CBZ) ไดโคลฟีแนค (diclofenac; DIC) และไอบูโพรเฟน (ibuprofen; IBU) ในแหล่งน้ำที่ใช้ผลิตน้ำดื่ม ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันที่มีวัสดุรองรับ (โมดูล) ชนิดแผ่น ขนาด $250 \times 98 \times 24$ มิลลิเมตร ซึ่งทำการศึกษาโดยผันน้ำดิบที่ทำการ spike ยา CBZ DIC และ IBU ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน

และทำการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นไปเรื่อยๆ ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ คือ 0.025 0.05 และ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร เติมน้ำแบบไหลตามขวาง (cross flow-rate) และยุติการเดินระบบเมื่อปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านเยื่อกรองลดลง 4 เท่าของอัตราการไหลเริ่มต้น หรือที่ VRF= 4 ทำการวัดความเข้มข้นของยาแต่ละชนิดที่ไหลผ่านเยื่อกรอง (permeate) ด้วยวิธี LC-MS มีการทดลองกระบวนการนาโนฟิลเตรชันด้วยน้ำดิบที่ไม่ได้ทำการ spike ยาลงไปในน้ำเป็นถังควบคุม ใช้ FT-IR ในการศึกษาพื้นผิวของตัวกรองก่อนและหลังผ่านดำเนินระบบ และมีการวิเคราะห์น้ำโดยใช้ UV254 และ UV280 ทดสอบหาสารอินทรีย์และ aromatic organic compound ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า สารประกอบอินทรีย์มีประสิทธิภาพการถูกกำจัดสูงกว่าการกำจัดยา โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึง 87-92% ในขณะที่เดียวกัน ผลิตภัณฑ์ยามีประสิทธิภาพ ดังนี้ ประสิทธิภาพการกำจัด DIC($\approx 60\%$) > IBU($\approx 50\%$) > CBZ($\approx 30\%$) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของอนุภาคยาเล็กกว่า MWCO ของเยื่อเมมเบรน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อตรวจสอบเมมเบรนหลังเดินระบบด้วย FT-IR พบ intense bands ใหม่ ที่ 1072 cm^{-1} และ 1011 cm^{-1} ซึ่งให้ผลึกเกลือแคลเซียมสะสมอยู่บนผิวเมมเบรน

Falamarzian และคณะ (2014) ศึกษาการบำบัดผลิตภัณฑ์ยาในน้ำเสียโดยวิธีการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนใต้น้ำอยู่ในสภาวะกึ่งวิกฤต (subcritical water reaction) และสภาวะวิกฤต (supercritical water reaction) ทำการทดลองแบบทีละเท (batch) ผลิตภัณฑ์ยาที่ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดมี 3 ชนิด คือ คาร์บามาซีปีน (carbamazepine) เมโทโพรลอล (metoprolol) และซัลฟาเมโทกซาโซล (sulfamethoxazole) ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารแต่ละชนิดเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดำเนินการทดลองโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 498 – 773 เคลวิน พร้อมทั้งปรับความดันในช่วง 1.5 – 30.0 MPa เวลาทำปฏิกิริยา 20 และ 30 นาที ทำการทดลองอีกครั้งโดยใช้ NaOH หรือ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ หรือทั้งสองตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดยา เวลาการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น สำหรับการเร่งปฏิกิริยาพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดคาร์บามาซีปีนและเมโทโพรลอลสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพการบำบัดซัลฟาเมโทกซาโซลลดลง จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในการใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดการกัดกร่อนถึงปฏิกิริยาอย่างรุนแรง

Altmann และคณะ (2014) เปรียบเทียบการกำจัดมลสารด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน (ozonation) และกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon; PAC) ในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสูง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำขาออกจากโรงบำบัดน้ำ 4

แห่งใน Berlin ซึ่งทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matters; DOC) และผลิตภัณฑ์ยาด้วย UV254 ทดลองการดูดซับด้วยถังปฏิกรณ์แบบทีละเทใช้ PAC ความเข้มข้นในช่วง 2.5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาพักน้ำ 30 นาทีและ 48 ชั่วโมง ทดลองบำบัดด้วยกระบวนการ ozonation ใน bench-scale batch ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 10 นาที โอโซนที่เหลือจะถูกกำจัดออกจากระบบด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ ผลิตภัณฑ์ยาที่สนใจ คือ คาร์บามาซีปิน (carbamazepine) ไดโคลฟีแนค (diclofenac) เบนโซไตรอาโซล (benzotriazole) ไอโอเมพรอล (iomeprol) ซัลฟาเมโทซาล (sulfamethoxazole) และเบนซาไฟเบรท (benzafibrate) จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดทั้งสองกระบวนการเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ DOC ลดลง อย่างไรก็ตามทั้งสองกระบวนการมีประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคออกจากน้ำได้ดีแม้ว่ามี DOC ความเข้มข้นสูง carbamazepine และ diclofenac ถูกกำจัดหรือเปลี่ยนรูปได้ดีทั้งสองกระบวนการ กระบวนการดูดซับด้วย PAC เหมาะสำหรับการกำจัด benzafibrate benzotriazole และ iomeprol เมื่อเทียบกับกระบวนการ ozonation ในขณะที่ sulfamethoxazole ถูกกำจัดได้ดีด้วยกระบวนการ ozonation และเวลาในการพักน้ำ 30 นาทีไม่เพียงพอสำหรับการใช้ PAC บำบัดผลิตภัณฑ์ยา แต่เมื่อพิจารณาการบำบัด DOC พบว่า กระบวนการ ozonation เปลี่ยนรูป DOC จากโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เล็กลงโดยไม่ทำให้ความเข้มข้น DOC น้อยลง ในขณะที่เดียวกันการดูดซับด้วย PAC สามารถดูดซับโมเลกุล DOC ทุกขนาด

Nguyen และคณะ (2012) ศึกษาการกำจัดมลสารอินทรีย์ด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเยื่อกรอง ร่วมกับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (MBR-GAC) การทดลองนี้ เป็นการทดลองแบบทีละเท (batch) ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 5.5 ลิตร ใช้หัวเชื้อตะกอนเร่งจากห้องปฏิบัติการอื่นที่มีการดำเนินการมากกว่า 3 ปี ถูกควบคุมระบบให้ดำเนินการภายใต้ อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชของระบบ 7.2 - 7.5 และค่าออกซิเจนละลาย 3 ± 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาพักน้ำ (hydraulic retention time) 24 ชั่วโมง ในระบบนี้ไม่มีการทิ้งตะกอนออกจากระบบ ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ประกอบด้วย กลูโคส (glucose) 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เปปโตน (peptone) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ยูเรีย (urea) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียมอะซิเตต (sodium acetate) 295 มิลลิกรัมต่อลิตร COD 600 มิลลิกรัมต่อลิตร TOC 180 มิลลิกรัมต่อลิตร และ TN 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และเตรียมมลสารที่สนใจ โดยความเข้มข้นตั้งต้นของมลสารแต่ละตัวอยู่ที่ 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากใส่น้ำเสียสังเคราะห์ในระบบแล้ว ใช้ระยะเวลาเริ่มเดินระบบ (started up) 6 สัปดาห์ โดยมีการวัดค่าพีเอชทุกวัน เมื่อสิ้นสุดสัปดาห์ที่ 6 นำมลสารที่สนใจทั้งหมดใส่ในระบบ หลังจากนั้น 2 สัปดาห์ นำคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร ยาว 22 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ GAC-1200 จำนวน 7.5 กรัม

อัตราเร็วของน้ำผ่านคอลัมน์ 2.4 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบ MBR-GAC ดำเนินการเป็นเวลาทั้งสิ้น 4 สัปดาห์ ใช้วิธี GC-MS วิเคราะห์ความเข้มข้นของมลสารที่เหลืออยู่ในระบบ และมีการวัดพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ ด้วย จากการทดลอง น้ำขาออกจากระบบ MBR มีความขุ่น ต่ำกว่า 0.2 NTU ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัด TOC คงที่ประมาณ 97-99% และ 31-68% สำหรับการกำจัด TN ปริมาณ MLSS เพิ่มขึ้นจาก 4.9 กรัมต่อลิตร เป็น 7.4 กรัมต่อลิตร มีมลสาร 5 ชนิดที่ประสิทธิภาพการบำบัดในระบบ MBR ต่ำกว่า 40% คือ Fenoprop Ketoprofen Naproxen Diclofenac และ Carbamazepine ซึ่งเมื่อต่อคอลัมน์ตัวดูดซับ GAC เข้ากับถัง MBR แล้ววัดความเข้มข้นมลสารในน้ำขาออกพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารทั้ง 5 ชนิดที่กล่าวถึงสูงสุดเท่ากับ หรือ มากกว่า 98% สรุปได้ว่าถึงปฏิกรณ์ MBR มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยได้ทางชีวภาพ แต่มีข้อจำกัดในการกำจัดสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และสารประกอบที่ตกค้างยาวนาน เช่น Fenoprop Ketoprofen Naproxen Diclofenac และ Carbamazepine ซึ่ง GAC ช่วยเสริมประสิทธิภาพการบำบัดด้วยระบบ MBR ได้ดี โดยใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นหลัง

Lowenberg และคณะ (2014) ทำการศึกษากระบวนการและประสิทธิภาพของ PAC/UF ในการกำจัดมลสารจากน้ำทิ้งที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสีย โดยทำการทดลองระบบ PAC/UF 2 ระบบที่ต่างกัน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลสารทั้งสองระบบ น้ำที่ทำการวิเคราะห์เป็นน้ำขาออกจากโรงบำบัดน้ำ Birs ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ มีลักษณะพื้นฐาน ดังนี้ COD 26.2 ± 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic compound; DOC) 8.8 ± 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) 10.2 ± 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นมลสารขาเข้า แปรเปลี่ยนไปตามคุณภาพน้ำขาออกจากโรงบำบัดน้ำเสีย เลือกใช้ถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) 1300 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) 15 ไมโครเมตร เลขไอโอดีน (Iodine number) 10.50 และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue) 28 กรัมต่อกรัม กระบวนการบำบัดน้ำที่ศึกษาเป็นระบบผสมผสานระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration; UF) และระบบดูดซับถ่านกัมมันต์แบบผง (powdered activated carbon; PAC) ซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังนี้ ระบบแบบแรกเป็น pressurized PAC/UF ใช้ UF ชนิดอัดแรงดัน น้ำขาเข้าและ PAC ขนาด 17 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกป้อนเข้าถังผสม (mixing tank) ขนาด 30 ลิตร ใช้ระยะเวลาการสัมผัส 2 ชม. จากนั้นจะส่งน้ำผ่านถังเติมโคแอกกูแลนต์ (coagulant) เข้าสู่กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ระบบแบบที่สอง ใช้ UF ชนิดจมน้ำ (sPAC/UF) ไม่มีถังผสมน้ำขาเข้ากับ PAC ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกรอง แต่จะใส่ PAC ในเส้นท่อ ปริมาณ 17

มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำและ PAC จะส่งผ่านถังเติมโคแอกกูแลนต์และถัง UF ตามลำดับ ในระบบนี้ PAC จะมีระยะเวลา retention time ในถัง UF 30 ชั่วโมง ติดตั้งระบบเติมอากาศ 40 ลิตรต่อนาที่เพื่อทำให้ลดการสะสมสารในระบบ ควบคุมความเข้มข้น PAC ณ จุดสมดุล ให้ไม่เกิน 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยการปล่อยน้ำ (drain volume) ปริมาตร 1 ลิตรต่อชั่วโมง ที่เพอเมอเทฟลักซ์ (permeate flux) 23 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง โคแอกกูแลนต์ที่ใช้ป้อนถัง UF ทั้งสองแบบ มีปริมาณ 4 มิลลิกรัม Fe^{3+} ต่อลิตร จากการทดลองพบว่า กระบวนการบำบัดแบบผสมผสาน UF มีความสามารถในการกำจัดมลสารในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว ที่ขนาด PAC ประมาณ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และโคแอกกูแลนต์ 4 มิลลิกรัม Fe^{3+} ต่อลิตร โดยประสิทธิภาพการบำบัดมลสารของระบบ sPAC/UF สูงกว่าระบบ pPAC/UF ในทุกมลสารที่สนใจ (sulfamethoxazole (SMX) carbamazepine (CBZ) mecoprop (MEC) diclofenac (DCF) benzotriazole (BZT)) ผู้ศึกษาได้อธิบายว่า ระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับ PAC ในระบบ sPAC/UF นานกว่า pPAC/UF และมีความเข้มข้น PAC คงเหลือในระบบ จึงเป็นผลให้ sPAC/UF มีประสิทธิภาพการบำบัดมลสารดีกว่า และสามารถรับภาระน้ำ (ความเข้มข้นของมลสารที่กำจัด) ได้สูงกว่าระบบ pPAC/UF ในขณะที่ pPAC/UF ใช้พลังงานน้อยกว่า แต่สามารถรับภาระบรรทุก (volumetric load) ได้สูงกว่าระบบ sPAC/UF นอกจากนี้ ผู้ศึกษาได้อธิบายประสิทธิภาพการบำบัด CBZ และ DCF ของทั้งสองระบบที่น้อยกว่า 70% ว่าเป็นเพราะตัวกลางดูดซับมีความชอบดูดซับมลสารที่มีสภาพเป็นกลางมากกว่ามวลสารที่มีประจุลบ

2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการดูดซับคาร์บามาซิปีน

Kim และคณะ (2014) ศึกษากำจัดผลิตภัณฑ์ยา 12 ชนิดด้วยซิลิกาเมโซพอร์ชนิดเกล็ด (granular mesoporous silica SBA-15; GMS) ศึกษาสมบัติเคมีกายภาพของซิลิกาเมโซพอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น 2 ชนิด (GMS1 และ GMS2) และซิลิกาเมโซพอร์ชนิดผง (powder-type mesoporous silica SBA-15; PMS) พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของ PMS มากกว่า GMS 1 และ GMS 2 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ (kinetic adsorption) ทำการทดลองแบบทีละเท (batch) น้ำเข้ามีความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละมลสารเท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ควบคุมอุณหภูมิและพีเอชของระบบให้คงที่ ทำการวิเคราะห์ปริมาณมลสารในระบบด้วยวิธี SPE-LC-tandem-MS ที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่า ระบบที่ใช้ GMS1 และ GMS2 เป็นตัวกลางดูดซับมีความสามารถในการดูดซับยาได้สูงกว่าตัวกลางดูดซับ PMS แต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลช้ากว่าระบบดูดซับของตัวกลางดูดซับ PMS โดยเวลาถึง 8 ชั่วโมง สำหรับตัวกลางดูดซับ GMS แต่ใช้เวลาเพียง 15 นาทีสำหรับตัวกลาง PMS ผู้ศึกษาคาดว่ามลสารใช้เวลาในการแพร่ภายในรูพรุนของตัวกลาง

ดูดซับ GMS อย่างไรก็ดีตาม ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับ GMS น้อยกว่ากระบวนการดูดซับด้วย ตัวกลาง GAC ที่ใช้เวลาถึง 20 ชั่วโมง ผู้ศึกษาอภิปรายว่า เนื่องมาจาก GMS มีการจัดเรียงโครงสร้างที่ดีกว่า (well-ordered mesoporous) และมีสมบัติทางกายภาพที่อนุญาตให้ยาทั้ง 12 ชนิดแพร่บน ผิวและดูดซับในรูพรุนได้ ในกระบวนการดูดซับนี้ใช้แบบจำลองการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) อธิบายกลไกการดูดซับได้ดี ซึ่งพบว่าตัวดูดซับทั้งสาม มีชั้นกำหนด อัตราเร็วปฏิกิริยาเดียวกัน คือ ชั้นการแพร่ผ่านฟิล์ม ศึกษาแบบจำลองการดูดซับ พบว่า ผลสารส่วนใหญ่มีการดูดซับที่เป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ศึกษาผลของความเข้มข้นตั้งต้นของตัวถูกดูดซับ พบว่า อีออนยาที่มีสภาพเป็นกลาง และเป็นอีออนลบในสารละลาย ได้แก่ Carbamazepine Estrone Ketoprofen Ibuprofen Dicrofenac และ Gemfibrozil มีความสามารถในการถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น และมีอัตราการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับของอีออนยาที่มีประจุบวก ได้แก่ Atenolol และ Trimethoprim บนตัวกลางดูดซับ GSM1 และ 2 มีเพียง 63-76% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่เป็นเส้นตรง เมื่อศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ พบว่า อีออนยาที่มีประจุบวกมีอัตราการบำบัดที่สูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงทางไฟฟ้า (electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดทางกายภาพของปรากฏการณ์นี้ เห็นได้จาก ตัวกลางดูดซับ GSM1 ที่พื้นผิวมีประจุเป็นลบสูงกว่าตัวกลางดูดซับ GSM2 มีความสามารถในการดูดซับยาที่มีอีออนบวกได้มากกว่า และแรงทางกายภาพที่เป็นส่วนสำคัญในการดูดซับอีออนยาที่มีประจุลบบนผิวตัวดูดซับคือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

นอกจากนี้ Kim และคณะ (2014) ยังได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดผลิตภัณฑ์ยา โดยนำน้ำเสียจากอุตสาหกรรมยามาผ่านคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตรที่บรรจุตัวดูดซับ GSM1 ปริมาณ 5 กรัม ความหนาชั้นกรอง 66 เซนติเมตร พบว่า แม้ในน้ำเสียอุตสาหกรรมยามาจะมีสารรบกวนการดูดซับมากมาย เช่น สารอินทรีย์และอีออนโลหะ การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวกลาง silica-based นี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารมากกว่า 80%

Cai และคณะ (2014) ศึกษาการดูดซับคาร์บามาซีปีน (carbamazepine) ด้วยกราฟีนออกไซด์ (graphene oxide) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon; GAC) และท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังหลายชั้น (multi-walled nanotubes; MWCNTs) ศึกษาลักษณะสมบัติเคมีกายภาพของตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ที่วางจำหน่ายในท้องตลาด 3 ชนิด (C M และ A) เปรียบเทียบกับตัวกลางดูดซับ GAC และท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่าน

ก่อนปรับปรุงหมู่คาร์บอกซิลบนพื้นผิว (MWCNT-COOH) พบว่า กราฟีน C มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด แต่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากที่สุด 771 ตารางเมตรต่อกรัม ศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์ม การดูดซับของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ด้วยถึงปฏิกรณ์แบบทีละเท (batch) ภายใต้ อุณหภูมิและพีเอชคงที่ ทำการควบคุมอุณหภูมิในน้ำด้วย NaCl และ NaHCO₃ พบว่า อัตราเร็วการดูดซับ ของตัวกลางดูดซับกราฟีนและ MWCNT มีอัตราการดูดซับที่เร็วในช่วง 5 นาทีแรก หลังจากนั้น อัตราเร็วเริ่มลดลงและเข้าสู่สมดุลในเวลา 1 ชั่วโมง ต่างจากตัวดูดซับ GAC ที่อัตราการดูดซับเข้าสู่ สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง สมการปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order) เหมาะ สำหรับอธิบายอัตราการดูดซับของตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ชนิด C M A และ MWCNT-COOH ได้เป็นอย่างดี แต่สำหรับตัวกลางดูดซับ GAC ใช้แบบจำลองการดูดซับภายในรูพรุนในการอธิบายอัตรา การดูดซับที่เกิดขึ้น จากข้อมูลการทดลองแบบจำลองการดูดซับที่ใช้ในการอธิบายความสามารถในการ ดูดซับของตัวกลางดูดซับที่เหมาะสม คือ ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช จากการศึกษาความสามารถในการ ดูดซับของตัวดูดซับ graphene-based พบว่าพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้ดูดซับ CBZ ได้สูงขึ้น โดย ความสามารถในการดูดซับของ กราฟีนออกไซด์ C > M > A ตามลำดับ ตัวดูดซับ GAC มี ความสามารถในการดูดซับเทียบเท่ากับกราฟีนออกไซด์ M สำหรับ MWCNT-COOH มีความสามารถ ในการดูดซับสูงกว่ากราฟีนออกไซด์ M และ A แต่ยังไม่ดีกว่าการดูดซับของกราฟีนออกไซด์ C เมื่อ ทดสอบการคายการดูดซับพบว่า แอลกอฮอล์เป็นสารชะ CBZ ออกจากตัวดูดซับกราฟีนออกไซด์ได้ ดีกว่าน้ำ นอกจากนี้ ยังพบว่า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลต่อการดูดซับมลสารที่มีประจุบน ตัวดูดซับกราฟีนออกไซด์ โดยทำให้การดูดซับ มลสารที่มีประจุบวกเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และการดูดซับ มลสารที่มีประจุลบลดลง 1 เท่า ในช่วงพีเอช 6-10 ทั้งนี้ เป็นผลจากประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็น บวกในช่วงพีเอชดังกล่าว สรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของกราฟีนให้เหมาะสมกับตัวถูกดูดซับจะทำให้ ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

Suriyanon และคณะ (2013) ศึกษากลไกการดูดซับไดโคลฟีแนค (Diclofenac; DCF) และคาร์บามาซีปีน (carbamazepine; CBZ) บนตัวกลางดูดซับซิลิกาชนิดรูพรุนที่มีการ ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน(functionalized silica-based porous) ศึกษาลักษณะสมบัติเคมีกายภาพของ ตัวดูดซับ สังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ จากวัสดุซิลิกา HMS (Silica HMS material) และวิเคราะห์ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น ได้แก่ ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว หมู่ฟังก์ชันบน พื้นผิว pH_{PZC} เป็นต้น เทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) จากการทดลองพบว่า ขนาดรูพรุนของตัว ดูดซับ (เรียงจากขนาดใหญ่ที่สุดไปเล็กที่สุด) คือ SBA-15 > MCM-41 ≈ HMS > M-HMS > A-HMS > PAC พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface specific area; ตารางเมตรต่อกรัม) เรียงจากมาก

ที่สุดไปน้อยที่สุด คือ PAC (980) > M-HMS > SBA-15 > MCM-41 > HMS > A-HMS(712) เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิว พบว่า M-HMS และ PAC ที่พื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับ ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท ความเข้มข้นของมลสารแต่ละชนิด เท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วย rotary shaker ที่ 150 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และพีเอช = 7 พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับของการดูดซับ DCF และ CBZ บนตัวกลางดูดซับซิลิเกต และบนตัวกลางดูดซับ PAC สามารถอธิบายได้ด้วยสมการจลนพลศาสตร์แบบ pseudo-second-order โดยอัตราการดูดซับของ DCF และ CBZ บนตัวกลางดูดซับทุกตัวลดลงอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรกและถึงจุดสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า ไอโซเทอร์มเส้นตรง (linear isotherm) อธิบายการดูดซับของ DCF และ CBZ บนตัวกลางดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซับที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มนี้สูงกว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นจริง อนุมานได้ว่า การดูดซับของ DCF และ CBZ เกิดขึ้นบางส่วนของความสามารถดูดซับแบบขั้นเดียว ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับและปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันเดียวกันแต่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่างกัน ประสิทธิภาพการดูดซับมลสารจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ กลไกการดูดซับของตัวกลางดูดซับประเภทซิลิเกตขึ้นกับพีเอชของระบบ เมื่อพีเอชของระบบดูดซับเปลี่ยนไป ส่งผลให้ความสามารถดูดซับมลสารของตัวกลางดูดซับเปลี่ยนไปด้วย ทั้งนี้ เป็นผลมาจากความเป็นประจุของพื้นผิวตัวกลางดูดซับ และความเป็นประจุของตัวถูกดูดซับ จากการทดลองพบว่า สำหรับ DCF ซึ่งพื้นผิวมีประจุลบ จะมีกลไกการดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrostatic) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) เป็นหลัก จะเห็นว่า เมื่อค่าพีเอชของระบบสูงมากกว่าค่า pH_{PZC} ของตัวกลางดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ DCF จะลดลง เนื่องจากเกิดแรงผลักกันระหว่างมลสารและผิวของตัวกลางดูดซับ สำหรับ CBZ มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ($pK_a=12.6$) แรงดึงดูดด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นแรงหลักในการดึงดูดกันระหว่าง CBZ กับพื้นผิวของตัวกลางดูดซับประเภทนี้ ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนแปลงพีเอชของระบบกลับไม่มีทำให้ความสามารถในการดูดซับของ DCF และ CBZ บน PAC เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้ ยังพบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนตัวกลางดูดซับทั้งหมดเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (endothermic) และมีการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา

นอกจากนี้ Suriyanon และคณะ, 2013 ได้ทำการศึกษาการดูดซับแบบแข่งขันระหว่าง DCF และ CBZ บนตัวกลางดูดซับทั้งสองประเภท พบว่า บนตัวกลางดูดซับซิลิเกต ความสามารถในการดูดซับของ DCF น้อยกว่า CBZ ในระบบ bi-solute และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับมลสารแต่ละชนิดในระบบ single-solute และ bi-solute พบว่า ความสามารถในการดูดซับ DCF บนตัวดูดซับในระบบ bi-solute น้อยกว่าในระบบ single-solute แต่

ความสามารถการดูดซับ CBZ บนตัวดูดซับในระบบ bi-solute กลับมากกว่าในระบบ single-solute ผู้ทำการศึกษาอภิปรายว่า ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากมวลโมเลกุลของ CBZ น้อยกว่า DCF จึงทำให้แพร่เข้าสู่พื้นผิวตัวกลางได้เร็ว จึงแย่งพื้นดูดซับ (active sites) ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามบนตัวดูดซับ M-HMS ความสามารถในการดูดซับสารทั้งสองไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ CBZ และ DCF ไม่ได้แข่งขันกันโดยตรงแต่ พื้นดูดซับที่จับเป็นคอนละพื้นดูดซับกัน สำหรับการดูดซับบนตัวกลาง PAC ในระบบ bi-solute มลสารทั้งสองชนิดมีความสามารถในการถูกดูดซับลดลงกว่าในระบบ single-solute ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว PAC ที่ซับซ้อน หรือโครงสร้างรูพรุนที่ไม่เป็นระเบียบ

2.5.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแบบคัดเลือก (selectivity)

Lerman และคณะ (2013) ทำการศึกษาผลของการมีอยู่ของสารอินทรีย์ละลาย (Dissolved organic matter; DOM) และการแข่งขันของฟิแนนทรีน (phenanthrene; PHE) และ สารประกอบไบฟีนิล (biphenyl A; BPA) ที่มีต่อความสามารถดูดซับคาร์บามาซีปีน (carbamazepine: CBZ) ด้วยท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotube; SWCNTs) การทดลองนี้ ขั้นแรกเป็นการหาความสามารถในการถูกดูดซับของของสาร CBZ PHE และ BPA บน SWCNTs ทดลองในระบบทีละเท (batch) ในที่มีด เมื่อใส่สารที่ต้องการจะวิเคราะห์พร้อมกับ ตัวดูดซับ ทำการเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำมากรองเพื่อวัดค่า ความเข้มข้นของมลสารที่ทดสอบด้วย HPLC ทั้งนี้ยังมีการคำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของ มลสารที่ทดสอบเพื่อตรวจสอบการสูญเสียสารไปในระหว่างกระบวนการหรือไม่ โดยจะเปลี่ยนแปลงค่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารไปเรื่อยๆ ซึ่ง ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ PHE จะอยู่ในช่วง 1-1000 ไมโครกรัมต่อลิตร มีอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เท่ากับ 1:1000000 (0.25 มิลลิกรัม ต่อ สารละลาย 250 มิลลิลิตร) ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CBZ และ BPA อยู่ในช่วง 10-20000 ไมโครกรัมต่อลิตร และมี อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 1:100000 (1 มิลลิกรัม ต่อ สารละลาย 100 มิลลิลิตร) จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ SWCNTs ของ PHE>BPA>CBZ ตามลำดับ ขั้นที่สอง เป็นการศึกษาการแข่งขันของ PHE และ BPA ที่มีต่อ CBZ เพื่อแย่งพื้นที่ดูดซับบน SWCNTs ทำโดย ใส่ PHE (หรือ BPA) ลงไปในระบบการดูดซับที่มีความเข้มข้น แต่จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ CBZ แต่ความเข้มข้นของ PHE (หรือ BPA) จะคงที่ สำหรับความเข้มข้นของ PHE ที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.025 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความเข้มข้นของ BPA ที่ใช้ในการ ทดลอง คือ 0.05 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า ไม่มีการดูดซับแบบแข่งขันระหว่าง

CBZ และ PHE เนื่องจากสารทั้งสองถูกดูดซับด้วยตำแหน่งดูดซับที่ต่างกัน ในทางกลับกันความเข้มข้น BPA ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ชั้นที่สาม Lerman และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาผลของการมีอยู่ของ DOM ต่อการดูดซับ CBZ บน SWCNTs ใส่ DOM 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในระบบดูดซับ CBZ แล้วเปรียบเทียบผลระหว่างระบบที่มี และไม่มี DOM ซึ่งจะมีการศึกษาส่วนประกอบของ DOM ก่อนที่จะทำการศึกษาในขั้นตอนนี้ สำหรับขั้นสุดท้าย เป็นการศึกษากระบวนการดูดซับที่มี CBZ DOM และ BPA อยู่ร่วมกันในระบบ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับของ CBZ PHE และ BPA สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์ม Langmuir และ Polanyi ในระบบการดูดซับแบบสองตัวละลาย (bi-solute system) พบว่า PHE ไม่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ CBZ ในทางตรงกันข้าม BPA เป็นคู่แข่งที่สำคัญที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CBZ บน SWCNTs ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ BPA เพิ่มขึ้น (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้การดูดซับ CBZ ลดลงอย่างชัดเจน จากความสามารถในการดูดซับ 130 มิลลิกรัมต่อกรัม (ในระบบ single-solute) ลดลงเป็น 47 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K_d) ของ CBZ (ที่ $C_e=0.01S_w$) ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้ การดูดซับ CBZ ยังถูกรบกวนด้วยการมีอยู่ของ DOM ชนิดไม่ชอบน้ำ (HoA) ซึ่ง ค่า K_d ของ CBZ (ที่ $C_e=0.01S_w$) ลดลง 12% เมื่อมี BPA เข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ลดลง 60% เมื่อมี DOM เข้มข้น 20 mg/L และ ลดลง 75% เมื่อมี DOM และ BPA อยู่ร่วมกัน

C. Wang และคณะ (2014) ศึกษาความชอบการดูดซับของซัลฟาเมโทซาโซล (sulfamethoxazole; SMX) และคาร์บามาซีปีน (carbamazepine; CBZ) บนตัวดูดซับสองชนิดภายใต้ระบบ co-sorption ในการทดลองนี้ ทำการศึกษาความสามารถการดูดซับ (adsorption) และคายการดูดซับ (desorption) ของตัวกลางดูดซับ 2 ชนิด ในสารละลายที่มีตัวถูกละลายเดี่ยว (single-solute) และสารละลายที่มีตัวถูกละลายสองตัว (bi-solute) ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (batch) สารละลายพื้นฐาน (background solution) ที่ใช้ประกอบด้วย 0.01 โมลต่อลิตร $CaCl_2$ (0.01 mol/L $CaCl_2$) และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร NaN_3 ของ biocide (200 mg/L NaN_3 as Biocide) ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการทดลอง คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon; AC) และท่อคาร์บอนนาโนแบบผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotube; SC) ซึ่งปริมาณที่ใช้มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของของแข็งต่อสารละลาย 1:10000 ในการทดลองทุกระบบ สำหรับการดูดซับสำหรับการดูดซับในสารละลายที่มีตัวถูกละลายเดี่ยว จะเปลี่ยนความเข้มข้นมลสารเริ่มต้น (CBZ หรือ SMX) ในช่วง 1-50 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการดูดซับในสารละลายที่มีตัวถูกละลายสองตัว จะใช้มลสารแข่งขันความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาการดูดซับสารในระบบทั้งสอง จะทดลองภายใต้การควบคุมอุณหภูมิคงที่

25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นจะวัดความเข้มข้นมลสารที่เหลืออยู่ในระบบ เพื่อหาความสามารถในการดูดซับมลสารต่างๆของตัวกลางแต่ละชนิด (q) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับบนตัวกลางดูดซับของแต่ละมลสาร (k_d) และในการศึกษาการคายการดูดซับมลสารของตัวกลางดูดซับ จะนำตัวกลางดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้วในแต่ละระบบข้างต้นมาเขย่าในสารละลายพื้นฐานเป็นระยะเวลา 7 วัน แล้ววัดปริมาณมลสารที่เหลือ จากการศึกษาพบว่า แบบจำลอง Polanyi ใช้อธิบายความสามารถในการดูดซับเป็นอย่างดี สำหรับระบบดูดซับที่มีตัวถูกละลายเพียงตัวเดียว ทั้ง SMX และ CBZ ถูกดูดซับบน AC ได้มากกว่า SC และการคายการดูดซับตัวกลางดูดซับทั้ง 2 ชนิด คาย SMX ออกมามากกว่า CBZ ผู้เขียนอภิปรายว่า เนื่องจาก CBZ มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และ K_{ow} สูงกว่า SMX และมีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่า SMX หรืออาจมีพันธะ $\pi - \pi$ ต่อตัวดูดซับทั้งสองชนิดมากกว่า SMX การศึกษาการมีอยู่ของตัวแข่งขันต่อประสิทธิภาพการดูดซับของมลสารหลัก พบว่ามีการรบกวนการดูดซับมลสารหลัก ทำให้มลสารหลักถูกดูดซับน้อยลง แต่ CBZ เป็นตัวแข่งขันที่แข็งแกร่งกว่า SMX เนื่องจากค่า K_d ของ SMX ในระบบ single-solute สูงกว่าค่า K_d ในระบบ bi-solute การคายการดูดซับของระบบที่มีสารถูกละลายสองตัวพบว่า เมื่อมี CBZ เป็นตัวรบกวนการดูดซับ SMX ถูกคายออกได้มากขึ้น จากตัวกลางทั้งสองชนิด ในทางตรงกันข้าม การมี SMX เป็นตัวรบกวนการดูดซับ ไม่ทำให้การคาย CBZ ออกจากตัวกลางดูดซับทั้งสองเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ไม่สามารถอธิบายได้ว่า ค่า K_d ที่สูงจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เห็นได้จากค่า K_d ของการดูดซับ SMX บน AC สูงกว่า K_d ของการดูดซับ SMX บน SC แต่การแข่งขันของ SMX ต่อ CBZ ที่จะจับกับพื้นผิวตัวกลางบน SC กลับมีค่าสูงกว่าบน AC

Cabrera-Lafaurie และคณะ (2014) ศึกษาการดูดซับระบบที่มีตัวถูกละลาย 1 ตัว (single component) และตัวถูกละลายหลายตัว (multi-component) ของกรดซาลิซิลิก (salicylic acid) กรดคลอโรฟิบริก (clofibrilic acid) คาร์บามาซีปีน (carbamazepine) และคาเฟอีน (caffeine) บนตัวกลางดูดซับประเภทเคลย์ชนิดที่ปรับแต่งด้วยโลหะทรานซิชัน (transition metal modified clay) และเคลย์ที่ผ่านกระบวนการ calcination ตัวดูดซับที่นำมาทดลองมี 4 ชนิดคือ CoAlOr-CuAlOr- NiAlOr- และ CoAlOr-NaBt (partial calc.) ทดลองโดยใช้ตัวกลางดูดซับลงในคอลัมน์ ทำการศึกษาการดูดซับระบบ single component และ multi-component บนตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารแต่ละตัวเท่ากับ 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาจะผันน้ำที่มีมลสารที่สนใจผ่านคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับด้วยความเข้มข้นคงที่ และวัดความเข้มข้นของมลสารที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์ และทำการพลอตกราฟระหว่างปริมาตรน้ำต่อมวลของตัวดูดซับ กับ สัดส่วนความเข้มข้นของมลสารขาออกต่อความเข้มข้นของมลสารขาเข้า ทำการทดลองจนกระทั่งถึงจุด

breakthrough ของแต่ละมลสาร แล้วทำการพลอตกราฟ breakthrough curve พิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับจากเวลาที่เข้าสู่ breakthrough point จากการศึกษาพบว่าปริมาณการดูดซับและการดูดซับแบบคัดเลือกขึ้นกับชนิดของโลหะทรานซิชันบนผิวเคลือบและสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลางดูดซับ ในการดูดซับระบบ single component ตัวดูดซับ CoAlOr-NaBt CuAlOr-NaBt NiAlOr-NaBt สามารถดูดซับได้ดีเกือบทุกมลสารที่ทำการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดซาลิซิลิกและกรดคลอโรฟิบริค ยกเว้นคาเฟอีนที่ถูกดูดซับได้ดีใน CoAlOr-NaBt (partial calc.) สำหรับคาร์บามาซีปีนถูกดูดซับได้ดีใน NiAlOr-NaBt CuAlOr-NaBt และ CoAlOr-NaBt ตามลำดับ แต่ยังไม่ดีเท่ากับการดูดซับกรดซาลิซิลิกและกรดคลอโรฟิบริค แต่เมื่อศึกษาการดูดซับระบบ multi-component พบว่าความสามารถในการดูดซับมลสารแต่ละชนิดบนตัวกลางดูดซับลดลง ยกเว้นความสามารถในการดูดซับคาร์บามาซีปีนในระบบ multi-component บนตัวกลางดูดซับโลหะคอปเปอร์ (CuAlOr-) ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังเป็นที่น่าสังเกตว่า CoAlOr-NaBt มีความชอบที่จะดูดซับคาร์บามาซีปีนมากกว่ามลสารตัวอื่น ผู้ทำการศึกษานำเสนอว่าในการกำจัดผลิตภัณฑ์ยาและสารอื่นๆ ออกจากน้ำควรใส่ตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดลงในคอลัมน์แบบ fixed bed โดยผู้ศึกษาได้ยกตัวอย่างโครงสร้างการจัดเรียงตัวกลางดูดซับในคอลัมน์ ดังนี้ CuAlOr-NaBt : CoAlOr- NaBt : CoAlOr-NaBt (partial calc.) : NiAlOr-NaBt ตามลำดับ เหมาะสำหรับการบำบัดผลิตภัณฑ์ยาดังนี้ CuAlOr-NaBt และ CoAlOr- NaBt กำจัดคาร์บามาซีปีนก่อน จากนั้น CoAlOr-NaBt (partial calc.) ใช้กำจัดคาเฟอีน และบำบัดกรดด้วย NiAlOr-NaBt

2.5.5 งานวิจัยเกี่ยวกับผลของ ION BRIDGING

Bui และคณะ (2010) ศึกษาผลกระทบของค่าความแรงไอออน (ionic strength) ไอออนลบ (anions) ไอออนบวก (cations) และสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter; NOM) ต่อการดูดซับผลิตภัณฑ์ยาบนตัวกลางดูดซับซิลิกา ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (batch) ใช้ตัวกลางดูดซับซิลิกา และมลสารที่สนใจ มีดังนี้ คาร์บามาซีปีน (carbamazepine; CBZ) ไดโคลฟีแนค (diclofenac; DCF) ไบรูโพรเฟน (ibuprofen; IBP) และ คีโตโพรเฟน (ketoprofen; KTP) ศึกษาผลของค่าความแรงไอออน (ionic strength) ต่อการดูดซับมลสาร พบว่าค่า Ionic strength ไม่ส่งผลทางสถิติต่อการดูดซับ DCF และ IBP แต่อย่างไรก็ตามค่าความแรงไอออน (ionic strength) ที่เพิ่มขึ้น จากช่วง 0-1 มิลลิโมลาร์ ถึงช่วง 20-50 มิลลิโมลาร์ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของการดูดซับ CBZ และการดูดซับ KTP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ศึกษาผลของการมีไอออนต่อการดูดซับ ในการศึกษาผลของไอออนลบ ทำการทดลองโดยใส่ไอออนลบหลายชนิดลงใน

ระบบ โดยความเข้มข้นแต่ละชนิดเท่ากับ 1 มิลลิโมลาร์ พบว่า อีออนลบไม่ส่งผลกระทบต่อการดูดซับมลสารบนตัวกลางดูดซับซิลิกา สำหรับการศึกษามลสารกระทบอีออนบวก ทำการทดลองโดยใช้อีออนประจุบวก 2 (divalent) ความเข้มข้น 1-5 มิลลิโมลาร์ และอีออน ประจุบวก 3 (trivalent) 0.1 มิลลิโมลาร์ลงในระบบการดูดซับ พบว่าอีออนบวกมีผลต่อการดูดซับมลสารของตัวกลางดูดซับซิลิกา โดยพบว่า อีออนประจุบวก 2 ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ทำให้มีการดูดซับ IBF สูงขึ้นเล็กน้อย อีออนบวก 3 ทำให้การดูดซับของผลิตภัณฑ์ยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดถูกดูดซับสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งผู้ศึกษาอภิปรายว่า อาจเกิดอีออนเชิงซ้อนชนิดผิวชั้นในระหว่างอีออนบวก มลสาร และผิวของตัวดูดซับอีออนบวก 2 และบวก 3 ไม่ส่งผลต่อการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับซิลิกา จากการศึกษาผลของ NOM ต่อการดูดซับพบว่า ตัวกลางดูดซับมีความสามารถในการดูดซับ มลสารต่างๆ ลดลง ยกเว้น DCF สรุปได้ว่า ionic strength อีออนบวก และ NOM เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของผลิตภัณฑ์ยาบนตัวดูดซับซิลิกา ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง (fate) ของยาในน้ำตามธรรมชาติ

Chen และคณะ (2014) ทำการศึกษามลของฟิเอซ ค่าความแรงอีออน (ionic strength) และการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อการดูดซับซัลฟาเมโทซาลโซล (sulfamethoxazole; SMX) บนกราฟีน (graphene) ศึกษาความสามารถในการดูดซับของกราฟีนที่ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน และกราฟีนที่ไม่ได้ทำการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน (pristine graphene) พบว่า ตัวดูดซับประเภทกราฟีน (graphene-based) มีความสามารถในการดูดซับ SMX ที่สูง มีความสัมพันธ์เป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) โดยความสามารถในการดูดซับของกราฟีนเป็นดังนี้ pristine graphene (2390 มิลลิกรัมต่อกรัม) > graphene-NH₂ (40.6 มิลลิกรัมต่อกรัม) > graphene-COOH (20.5 มิลลิกรัมต่อกรัม) > graphene-OH (11.5 มิลลิกรัมต่อกรัม) ศึกษาผลของฟิเอซต่อการดูดซับของกราฟีน ทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าฟิเอซ 3 ค่า คือ 2 6 และ 9 พบว่า ฟิเอซของสารละลายส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับบนตัวกลางดูดซับประเภทกราฟีน เมื่อค่าฟิเอซของสารละลายลดลงเหลือ 2 การดูดซับ SMX บน pristine graphene เพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า แต่เมื่อสารละลายมีค่าฟิเอซเพิ่มขึ้นเป็น 9 ตัวดูดซับกราฟีนทุกตัวสูญเสียความสามารถในการดูดซับ SMX ผู้ศึกษาอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับ SMX บนพื้นผิวกราฟีนว่าเกิดจากแรงอันตรกิริยา π - π (electron donor interaction) ศึกษาผลกระทบของค่าความแรงอีออน (ionic strength) ต่อการดูดซับ ทำการเปลี่ยนแปลงค่า ionic strength ด้วย NaCl ในช่วงความเข้มข้น 0-0.5 โมลาร์ จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับของกราฟีนที่ถูกปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน (functionalized graphene) ลดลงเมื่อค่าความแรงอีออน (ionic strength) เพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ค่าความแรงอีออนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซับของ pristine graphene เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Kerr และคณะ (2012) ศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมที่ลดลงต่อการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matters; DOC) บนดินอนินทรีย์ (mineral soils) เพื่อนำไปใช้ดูแนวโน้มของ DOC ในป่าเหนือพื้นที่รับน้ำในตอนใต้ของเมือง Ontario ประเทศแคนาดา ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ DOC บนดินอนินทรีย์ พบว่าสามารถอธิบายได้ดีด้วย ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ทำการศึกษาผลกระทบของ pH Ca^{2+} Na^+ SO_4^{2-} และ Ionic strength ต่อการดูดซับ DOC ใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ DOC ในช่วง 0-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุม Ionic strength พื้นฐานอยู่ที่ 0.4 มิลลิโมลาร์ ทำการวัดปริมาณ DOC ที่เหลืออยู่ในน้ำหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ และคำนวณหาค่า binding affinity (k) จาก $RE = \frac{k \cdot Q_{max} \cdot X_f}{1 + k \cdot X_f} - b$ โดย RE คือมวลของ DOC ที่ถูกดูดซับต่อมวลของดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) Q_{max} คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) b คือ มวลของ DOC ที่ดูดซับบนดินที่ความเข้มข้น DOC เริ่มต้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ X_f คือ ค่าความเข้มข้นของ DOC ในสารละลายหลัง 24 ชั่วโมง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จากการศึกษาพบว่า DOC ถูกดูดซับได้ลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นจาก 3.5 ไป 5.5 อีออน Na^+ และ SO_4^{2-} ไม่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ DOC บนดินอนินทรีย์ ในทางตรงกันข้ามการลดลงของอีออน Ca^{2+} มีผลกระทบอย่างเห็นเด่นชัดต่อการดูดซับ DOC เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ca^{2+} ลดลง ค่า binding affinity ลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ DOC ดูดซับบนดินอนินทรีย์ได้ดีขึ้น อธิบายได้ว่า การลดลงของ Ca^{2+} ส่งผลให้เกิด Ion Bridging ของประจุบวกก็ลดลงด้วย ทำให้การดูดซับของ DOC บนดินอนินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งผู้ศึกษาอภิปรายว่าการลดลงของ Mg^{2+} และ Al^{3+} น่าจะลด cation bridging ลงด้วยซึ่งอาจส่งผลต่อการดูดซับ DOC บนดินอนินทรีย์ สำหรับผลกระทบของ Ionic strength จะขึ้นกับอีออนบวกในสารละลาย ถ้าอีออนบวกในสารละลายเป็น Ca^{2+} พบว่า เมื่อ Ionic strength เพิ่มขึ้น การดูดซับ DOC ก็เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากทำการทดลองข้างต้น ผู้ศึกษาได้รวบรวมข้อมูลสำหรับ DOC Ion strength pH Ca^{2+} Mg^{2+} Na^+ K^+ Cl^- และ SO_4^{2-} ของลำน้ำในลุ่มน้ำเมือง Ontario ที่ตรวจวัดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1986 – 1995 และปี ค.ศ. 1999 ถึงปัจจุบัน (2012) มาทำฐานข้อมูลเชิงสถิติด้วย SPSS เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอีออนและการดูดซับ DOC บนดินอนินทรีย์ต่อไป

จากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำต่างๆ มาใช้กำจัดยา कार์บามาซิปีนหรือยาอื่นๆ ออกจากน้ำเสียในระดับห้องปฏิบัติการ ไม่ว่าจะ เป็นกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางกายภาพที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น การบำบัดทางชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแอมเบรอน การใช้ปฏิริยาออกซิเดชันขั้นสูง หรือแม้กระทั่งนำกระบวนการต่างๆ เหล่านี้มาศึกษาในรูปแบบกระบวนการผสม (hybrid process) เช่น MBR-NF UV-AOP เป็นต้น ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำโดยส่วนใหญ่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บามาซิปีน หรือ

ในบางกระบวนการที่มีการกำจัดคาร์บามาซีปีนที่สูง แต่เกิดสารพลอยได้ (by-products) ที่มีแนวโน้มจะก่อความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีหลายงานวิจัยพบว่า กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการบำบัดคาร์บามาซีปีน มีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซีปีนด้วยวัสดุตัวกลางดูดซับหลายๆ ประเภท แต่อย่างไรก็ตามในสถานะน้ำจริงตามธรรมชาติมีมลสารมากมายอยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติและไอออนต่างๆ รวมทั้งยาที่เหลือตกค้างอื่นๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับ จึงมีการศึกษาวิจัยผลกระทบของมลสารดังกล่าวต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดซิลิกา แต่ยังไม่มีการวิจัยผลกระทบของสารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ในน้ำต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน ทั้งนี้ตัวดูดซับชนิดคาร์บอนเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่มากและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่หลากหลาย งานวิจัยนี้จึงเห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ในน้ำต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำตัวกลางดูดซับประเภทนี้ไปใช้ในกระบวนการดูดซับจริงต่อไป โดยตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และกราฟีนชนิดแขวนลอย ซึ่งจะทำให้การศึกษากลไกการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับคาร์บอน ปัจจัยทางเคมีและกายภาพของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนศาสตร์และความสามารถในการดูดซับ ศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ และการดูดซับแบบคัดเลือกภายใต้การมีอยู่ของสารอินทรีย์ ไอออนต่างๆ และยาตกค้างร่วมกับคาร์บามาซีปีน ซึ่งในระบบการดูดซับจะใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช เท่ากับ 7 และค่าความแรงประจุพื้นฐาน (background ionic strength) เท่ากับ 10 มิลลิโมลาร์ ให้ใกล้เคียงน้ำเสียจริงในธรรมชาติ สำหรับการศึกษามูลของพีเอชจะปรับค่าพีเอชในช่วง 6.2 – 8.2 เพื่อให้บัฟเฟอร์สามารถรักษาสภาพความเป็นบัฟเฟอร์และควบคุมพีเอชระบบให้คงที่ได้ ซึ่งบัฟเฟอร์จะรักษาความเป็นบัฟเฟอร์ได้ดีในช่วงพีเอช เท่ากับ $pK_{a(\text{buffer})} \pm 1$ โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์มีค่า $pK_{a,2} = 7.2$

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 1) เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิว BET (Autosorb 1 MP, Quantachrome)
- 2) Fourier transform infrared (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700 ยี่ห้อ Thermo Scientific
- 3) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Genesys 10S UV-VIS ยี่ห้อ Thermo Scientific
- 4) เครื่อง HPLC-DAD รุ่น 1100 Series ยี่ห้อ Agilent
- 5) เครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (TOC) รุ่น TOC-L ยี่ห้อ Shimadzu
- 6) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น GR200 ยี่ห้อ AND
- 7) เครื่องปั่นเหวี่ยงมากกว่า 6000 รอบต่อนาที รุ่น C-28 ยี่ห้อ Boeco
- 8) เครื่องเขย่า รุ่น 3020 ยี่ห้อ GFL
- 9) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น SP-2100 ยี่ห้อ Syntex
- 10) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ยี่ห้อ Shin Saeng
- 11) เครื่องอ่างน้ำ (Water Bath Shaker) รุ่น Wisd ยี่ห้อ Dathon Scientific
- 12) เครื่อง sonicator ยี่ห้อ Crest
- 13) ตู้อบ ยี่ห้อ Binder
- 14) ตู้ดูดควัน ยี่ห้อ Neoflow
- 15) ชุดกรองแบบสุญญากาศ ยี่ห้อ Wheaton
- 16) Column C18 (C18 4.6 x 250 mm (5 μ m), GLS Science, USA)
- 17) Column C18 (Apollo 250 x 4.6 mm, 5 μ m, Alltech, Mainz)
- 18) เดสิเคเตอร์ ยี่ห้อ Duran
- 19) เครื่องแก้วที่จำเป็น

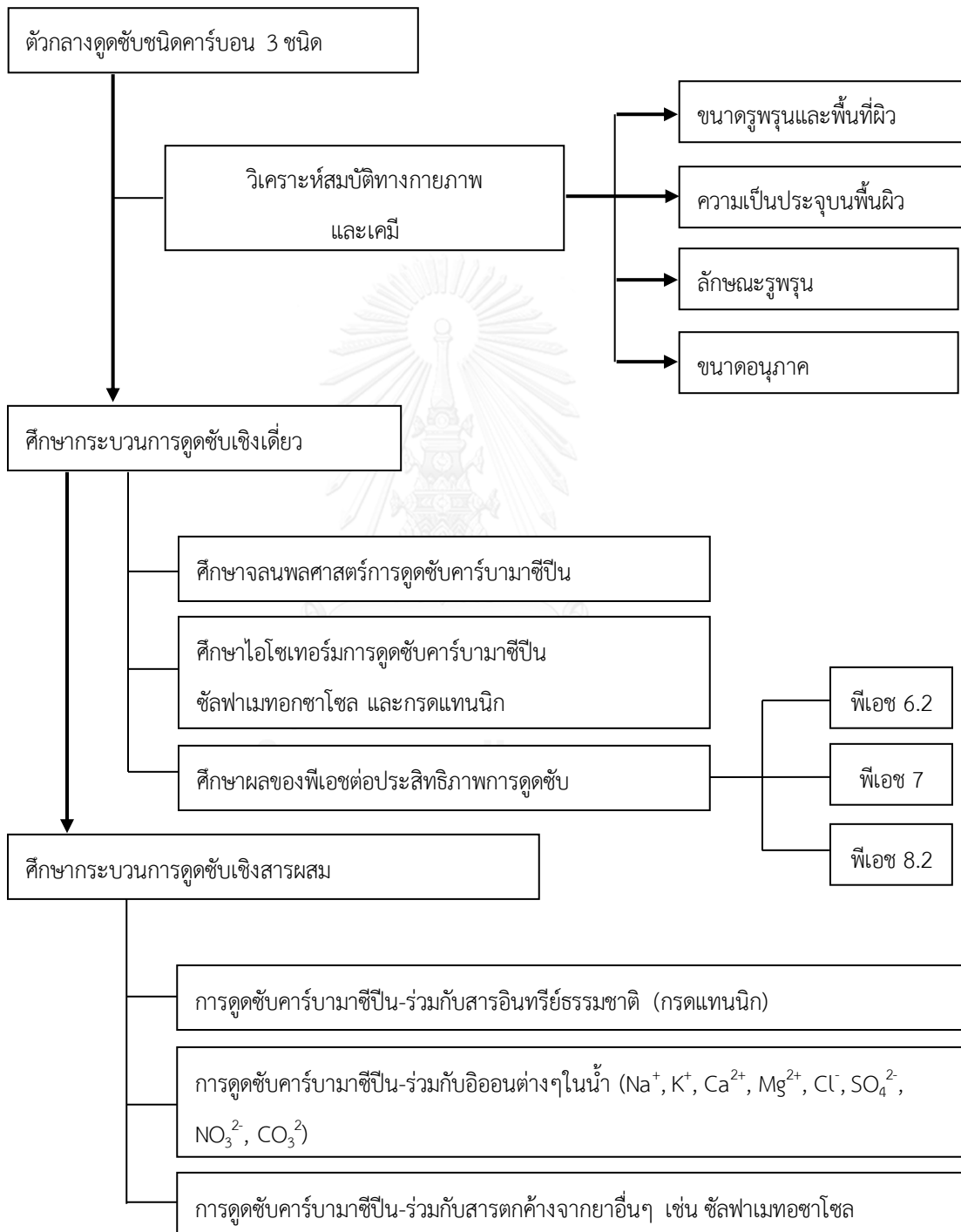
- 20) กระดาษกรองเมมเบรน ชนิด Nylon ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
- 21) Syringe filter ชนิด PTFE ยี่ห้อ Millipore ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน
และชนิด Nylon ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน
- 22) หลอดเซนทริฟิวซ์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ยี่ห้อ Kima
- 23) เทอร์โมมิเตอร์ รุ่น OMEGA ยี่ห้อ Hach

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) คาร์บามาซีป็น purity > 98% ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- 2) ซัลฟาเมทอกซาโซล purity > 98% ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- 3) กรดแทนนิก ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- 4) เมทานอล เกรด HPLC ยี่ห้อ Fisher
- 5) อะซิโตไนไตรล์ เกรด HPLC ยี่ห้อ Fisher
- 6) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง จาก Shirasaki S-10 EnviroChemicals, Ltd.
- 7) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ขนาด 4-12 mesh ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- 8) คาร์บอนชนิดกราฟีนออกไซด์
- 9) กราไฟต์ purity 99.99% ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- 10) สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 11) ก๊าซไนโตรเจน
- 12) กรดไฮโดรคลอริก 37% เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merck
- 13) โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 14) โซเดียมคลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 15) สารละลายมาตรฐานคลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 16) สารละลายมาตรฐานซัลเฟต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 17) โพแทสเซียมโบรไมด์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba
- 18) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba
- 19) กรดซัลฟิวริก 98% เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merck
- 20) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merck
- 21) โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba
- 22) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอิออนและสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอนแบบต่างๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และกราฟีนออกไซด์ โดย



รูปที่ 3.1 แผนการทดลองในการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน 3 ชนิด ดังนี้ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) ชนิดแขวนลอยในน้ำ (suspended in water) วัสดุดูดซับในงานวิจัย เป็นวัสดุที่วางจำหน่ายในท้องตลาด โดยถ่านกัมมันต์ชนิดผงนำมาจากบริษัท ShirasakiS-10 enviroChemicals, Ltd. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดนำเข้าจากบริษัท Sigma-Aldrich และตัวดูดซับกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเอง

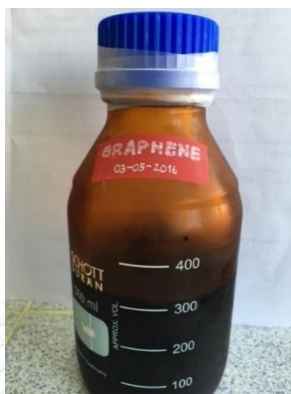
3.2.2 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

(Xu และคณะ, 2008)

- 1) เเทกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ปริมาตร 120 มิลลิลิตร ลงในขวด Duran ขนาด 2 ลิตร ที่แช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง ซึ่งควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ที่ 0 องศาเซลเซียส
- 2) ใส่กราไฟต์ (graphite) จำนวน 2 กรัมลงในกรดซัลฟิวริก พร้อมทั้งกวนสารให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- 3) ผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) จำนวน 15 กรัม อย่างช้าๆ พร้อมทั้งกวนสารให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ในขั้นนี้จะเห็นสารผสมเป็นสีเขียว
- 4) ย้ายขวด Duran มาแช่ในอ่างที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส กวนสารผสมอย่างช้าๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) หลังจากนั้น ย้ายขวด Duran มาแช่ในอ่างน้ำแข็งอีกครั้ง ค่อยๆ ผสมน้ำ DI ปริมาตร 230 มิลลิลิตร ภายใต้การกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ควบคุมอุณหภูมิของสารผสมไม่ให้เกินกว่า 20 องศาเซลเซียส ในขั้นนี้สารผสมจะปรากฏสีม่วงเข้ม และเกิดควันเนื่องจากการผสมน้ำลงในสารผสม
- 6) กวนสารผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 7) เติมน้ำ DI ปริมาตร 700 มิลลิลิตร และกวนเป็นเวลา 5 นาที
- 8) หลังจากนั้น เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 30% ปริมาตร 20 มิลลิลิตร สารผสมจะปรากฏสีเหลืองใส
- 9) แยกกราฟีนออกไซด์ออกจากสารละลายด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

10) ล้างกราฟีนออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 5% 3 ครั้ง เพื่อชะอิมโพลหะ จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI อีก 3 ครั้งเพื่อชะกรดที่ตกค้างอยู่

11) นำกราฟีนที่ได้ใส่ในถ้วย crucible และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นจึงเตรียมสารละลายกราฟีนออกไซด์เข้มข้น (Stock solution) 2000 มิลลิกรัม ต่อลิตรด้วยน้ำ DI 18.2 M Ω โดย sonicate เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง sonicator



รูปที่ 3.2 สารละลายกราฟีนออกไซด์เข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ตาม พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของตัวดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ / วิธีการวิเคราะห์
พื้นที่ผิวขนาดรูพรุน	Nitrogen Adsorption Isotherm
ประจุบนพื้นผิว	Acid-base titration หรือ Zeta potential

3.2.3.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว

ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน โดยเครื่อง Autosorb-1 Quantachrome automatic volumetric sorption analyzer ที่ 77 เคลวิน ก่อนทำการวิเคราะห์นำตัวอย่าง 0.05 กรัมไปใส่ในภาชนะที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่อาจจะอยู่บนพื้นผิว พื้นที่ผิวจำเพาะ (SBET) คำนวณโดยใช้สมการของ Brunner-Eller-Teller (BET) โดยการใช้อัตราส่วนไอโซเทอร์มการดูดซับของไนโตรเจน

ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุน (V_p) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ Barrett-Joyner-halenda (BJH)

3.2.3.2 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว

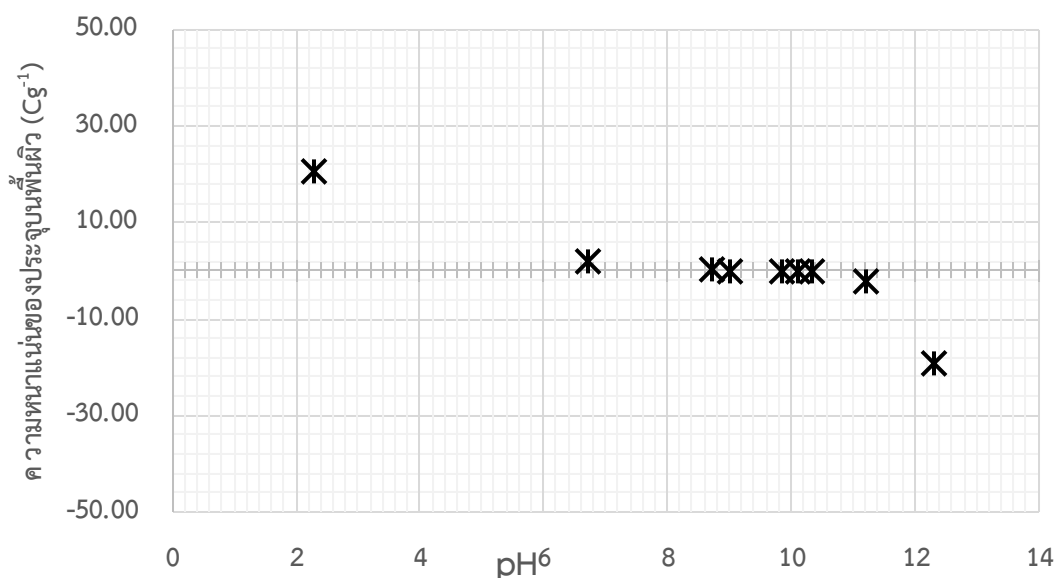
วิเคราะห์โดยการไทเทรตกรด-เบส

การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวดักกลางดูดซับโดยวิธีไทเทรตกรด-เบส (Punyapalukul และคณะ, 2004) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 25 mM ใน ultrapure (UP) water ($18.2 \text{ M}\Omega$) สัดส่วนของตัวกลางดูดซับต่อสารละลายผสมเป็น 1.0 กรัมต่อลิตร ทำการวิเคราะห์โดยแปลงค่าปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่จะเติมลงไปในแต่ละสารผสมกับตัวกลางดูดซับ 0.025 กรัม เพื่อแปลงค่าพีเอชให้ต่างกัน การไทเทรตจะควบคุมความแรงของประจุ (ionic strength) เท่ากับ 10 mM โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.01 โมลาร์ แต่ละตัวอย่างถูกเจือจางด้วยน้ำ UP water ให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 25 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปเขย่า 200 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง สามารถคำนวณค่าประจุบนพื้นผิวในหน่วยคูอมป์ต่อตารางเมตร (Cm^{-2}) จากค่าพีเอชของตัวอย่างที่วัดได้หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุล ได้ดังสมการ 3.1

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

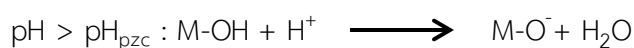
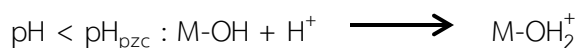
เมื่อ	$[HCl]$	คือ ความเข้มข้นของ HCl ที่เติม (mol/L)
	$[NaOH]$	คือ ความเข้มข้นของ NaOH ที่เติม (mol/L)
	$[H^+]$	คือ ความเข้มข้นของโปรตอนไอออน (mol/L) คำนวณได้จาก $\text{pH} = -\log[H^+]$
	$[OH^-]$	คือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (mol/L) คำนวณได้จาก $\text{pOH} = -\log[OH^-]$ และ $\text{pOH} = 14 - \text{pH}$
	96500	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C/mol)
	M	คือ น้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (g/l)
	S_{BET}	คือ พื้นที่จำเพาะของตัวกลางดูดซับ (m^2/g)

นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างค่าพีเอชสุดท้าย (แกน X) กับความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว (surface charge, cm^{-2}) (แกน Y) โดยจุดตัดแกน X คือ ค่าพีเอชที่ประจุสุทธิ (net charge) บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ ปริมาณประจุลบเท่ากับปริมาณประจุบวก ซึ่งค่าพีเอชใดๆ ที่พื้นผิวมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ เรียกว่า point of zero charge (pH_{pzc})



รูปที่ 3.3 สภาพความเป็นประจุของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ค่าพีเอชต่างๆ

จากรูป 3.3 จะเห็นได้ว่าความเป็นประจุบวกของพื้นผิวถ่านกัมมันต์จะมีค่าลดลงจนกระทั่งค่าพีเอชที่ทำให้พื้นผิวมีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า ซึ่งเรียกค่าพีเอชนี้ว่า pH_{pzc} จากรูป pH_{pzc} ของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมีค่าประมาณ 9.6 ดังนั้น หากประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ย่อมแสดงว่าพื้นผิวจะมีความเป็นบวก ในทางตรงกันข้าม หากน้ำเสียนั้นมีค่าพีเอชมากกว่า 9.6 จะส่งผลให้ประจุรวมบนพื้นผิวมีค่าเป็นลบ ตัวอย่างปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวของหมู่ฟังก์ชัน แสดงได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



3.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของมลสาร

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของมลสารก่อนและหลังการดูดซับบนตัวกลางดูดซับ โดยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR) วิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคป ช่วงสเปกตรัม 400-4000 cm^{-1} เตรียมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์โดยผสมผงตัวกลางดูดซับกับ KBr นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บในเดสิคเคเตอร์ก่อนทำการวิเคราะห์ เพื่อลดผลกระทบจากการรบกวนที่เกิดจากความชื้น

3.2.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของมลสาร

3.2.5.1 วิธีวัดปริมาณความเข้มข้นของมลสารในระบบดูดซับเชิงเดี่ยว

นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์โดยการนำไปกรองด้วย syringe filter ชนิด PTFE ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน (PTFE, 0.45 μm , Milipore Corp, Bedford, MA) หรือ ชนิด Nylon ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน (Nylon, 0.2 μm , Milipore Corp, Bedford, MA) นำส่วนที่ผ่านการกรองมาทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บามาซิปีน ซัลฟาเมทอกซาโซล และกรดแทนนิก ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 284 257 และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ (ที่ความหนาของเซลล์ 1 และ 5 เซนติเมตร) ซึ่งในระบบดูดซับที่ใช้ตัวกลางดูดซับกราฟีนออกไซด์ เมื่อนำชุดควบคุมที่ไม่มีมลสารมากรองด้วย syringe filter ชนิด Nylon ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน แล้ววัดค่าดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่ามีค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าดูดกลืนแสงของชุดควบคุมในระบบดูดซับที่ใช้กราฟีนออกไซด์เป็นตัวกลางดูดซับ*

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่า absorbance	
	1 cm-cell	5 cm-cell
257	0.027	0.071
275	0.008	0.039
284	0.010	0.050

*หมายเหตุ ค่า absorbance จะมีค่าแตกต่างกันกับประสิทธิภาพการกรองด้วยตัวกรอง โดยการกรองด้วย syringe filter ควรคำนึงถึงความดันสูงสุดที่ syringe filter รับผิดชอบได้ ทั้งนี้ แนะนำให้ดูจากข้อมูลจำเพาะ (specification) ของตัวกรอง

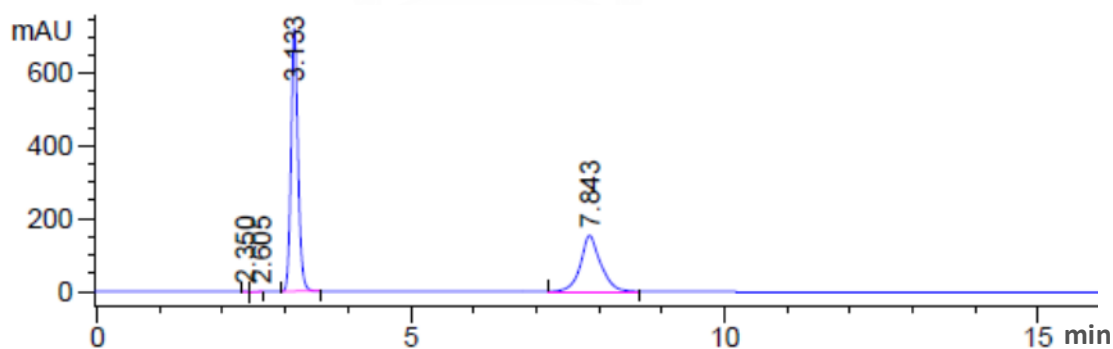
3.2.5.2 วิธีวัดปริมาณความเข้มข้นของมลสารในระบบดูดซับเชิงผสม

ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บามาซีปีนและมลสารอื่นๆ ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) ใช้ตัวตรวจวัดคือ diode array detector เตรียมตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์โดยนำไปกรองด้วย syringe filter ชนิด PTFE ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน (PTFE, 0.45 μm , Milipore Corp, Bedford, MA) หรือ ชนิด Nylon ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน (สำหรับระบบดูดซับที่ใช้กราไฟท์เป็นตัวกลางดูดซับ) นำส่วนที่ผ่านการกรอง 50 ไมโครลิตร ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของคาร์บามาซีปีนด้วย HPLC (HPLC 1100 series, Agilent Technology, Palo Alto, CA) (Marwah et al., 2005)

1) วิธีวัดปริมาณความเข้มข้นของสารผสมคาร์บามาซีปีนและ

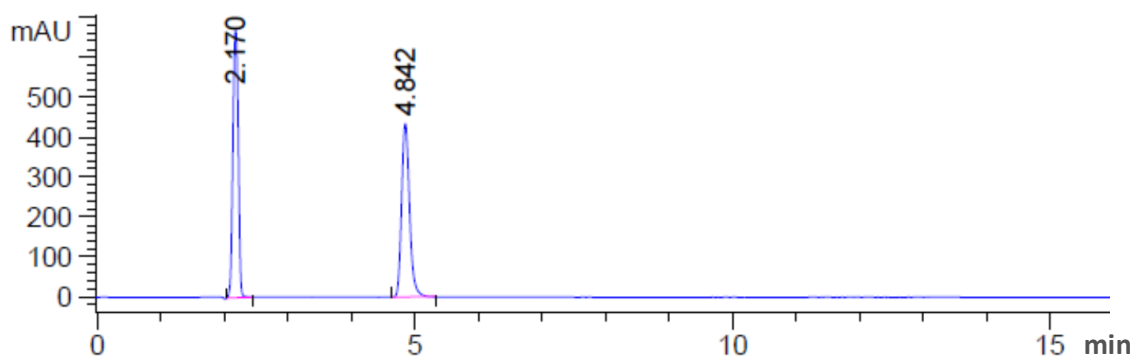
ซัลฟามेतอกซาโซล

วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์คือ C18 column (ODS Hypersil, 250 mm x 4.6 mm, 5 μm column, Hewett Packard, Palo Alto, CA) หรือ C18 Column (Apollo 250 x 4.6 mm, 5 μm , Alltech, Mainz) เฟสคงที่คือ reverse phase อุณหภูมิคอลัมน์ตั้งที่ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส เฟสเคลื่อนที่ใช้เมทานอล และน้ำ ในอัตราส่วนคงที่ที่ 60:40 (v:v) อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่เท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.4 โครมาโตแกรมของสารผสมซัลฟามेतอกซาโซลและคาร์บามาซีปีนที่แยกโดยคอลัมน์ C18 column (ODS Hypersil, Hewett Packard)

พีค SMX ที่ 3.140 ± 0.010 นาที และ พีค CBZ ที่ 7.840 ± 0.010 นาที ตามลำดับ

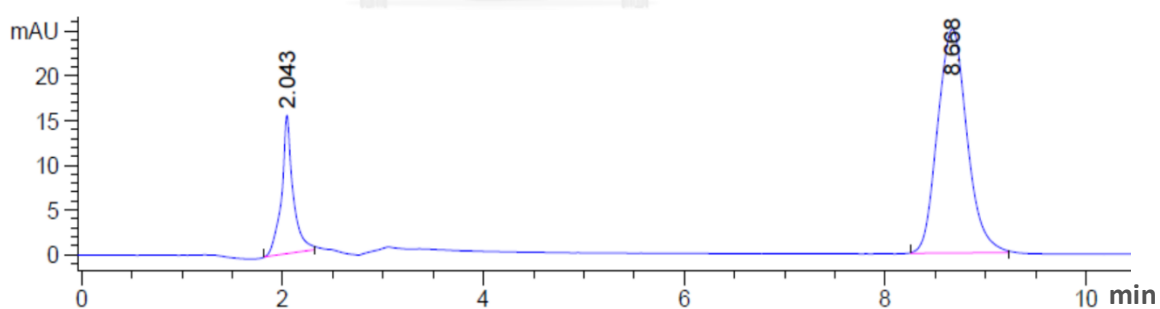


รูปที่ 3.5 โครมาโตแกรมของสารผสมซัลฟาเมทอกซาโซลและคาร์บามาซีปิ่นที่แยกโดยคอลัมน์ C18 Column (Apollo, Mainz)

พีค SMX ที่ 2.170 ± 0.010 นาที และ พีค CBZ ที่ 4.840 ± 0.010 นาที ตามลำดับ

2) วิธีวัดปริมาณความเข้มข้นของสารผสมคาร์บามาซีปิ่นและกรดแทนนิก

วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์คือ C18 Column (Apollo 250 x 4.6 mm, 5 μ m, Alltech, Mainz) เฟสคงที่คือ reverse phase อุณหภูมิคอลัมน์ตั้งที่ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส เฟสเคลื่อนที่ใช้อะซิโตรไนโตรล และน้ำ ในอัตราส่วนคงที่ที่ 40:60 (v:v) อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่เท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.6 โครมาโตแกรมของสารผสมกรดแทนนิกและคาร์บามาซีปิ่นที่แยกโดยคอลัมน์ C18 Column (Apollo 250 x 4.6 mm, 5 μ m, Alltech, Mainz)

พีค TNC ที่ 2.010 ± 0.030 นาที และ พีค CBZ ที่ 8.660 ± 0.030 นาที ตามลำดับ

3.2.6 การศึกษากระบวนการดูดซับเชิงเดี่ยว

3.2.6.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

- 1) เตรียมตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บอนมาซีปีนความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ในหลอดเซนทริฟิวซ์ จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ชนิดผง จำนวน 0.004 กรัม ใส่ลงไปในตัวอย่างน้ำ
- 2) ควบคุมพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 โดยฟอตเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 3) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 0, 1, 5, 10, 30, 60, 120 และ 240 นาที จากนั้นเก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง กรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วย syringe filter
- 5) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (จำนวน 0.1 กรัม) และกราฟีนออกไซด์ (จำนวน 0.002 กรัม) ตามลำดับ

3.2.6.2 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับมลสารบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

- 1) เตรียมตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บอนมาซีปีน ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ในหลอดเซนทริฟิวซ์
- 2) จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ชนิดผง จำนวน 0.004 กรัม ใส่ลงไปในตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บอนมาซีปีนความเข้มข้นต่างๆ
- 3) ควบคุมพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 โดยฟอตเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.6.1
- 5) กรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วย syringe filter
- 6) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตร-

โพโตมิเตอร์

- 7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 - 6 โดยเปลี่ยนมวลสารเป็นซัลฟาเมทอกซาโซลและกรดแทนนิก
- 8) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็นถ่านมันต์ชนิดเกล็ด (จำนวน 0.1 กรัม) และกราฟีนออกไซด์ (จำนวน 0.002 กรัม) ตามลำดับ

3.2.6.3 ศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บามาซิปีน

- 1) เตรียมตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บามาซิปีนบน ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ในหลอดเซนทริฟิวซ์
- 2) จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับถ่านมันต์ชนิดผง จำนวน 0.004 กรัม ใส่ลงไปในตัวอย่งน้ำที่มีคาร์บามาซิปีนต่างๆ
- 3) ปรับพีเอชของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 6.2, 7 และ 8.2 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.6.1
- 5) กรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วย syringe filter
- 6) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีสเปกโต-

โพโตมิเตอร์

- 7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็นถ่านมันต์ชนิดเกล็ด (จำนวน 0.1 กรัม) และกราฟีนออกไซด์ (จำนวน 0.002 กรัม) ตามลำดับ

3.2.7 การศึกษากระบวนการดูดซับเชิงสารผสม

3.2.7.1 ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการดูดซับคาร์บามาซิปีน

- 1) เตรียมตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บามาซิปีนความเข้มข้น ความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และเติม กรดแทนนิก ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหลอดเซนทริฟิวซ์

2) จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดผง จำนวน 0.004 กรัม ใส่ลงไปในตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บามาซิปีนความเข้มข้นต่างๆ

3) ควบคุมพีเอชของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.6.1

5) กรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วย syringe filter

6) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD

7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็นถ่านมันต์ชนิดเกล็ด (จำนวน 0.1 กรัม) และกราฟีนออกไซด์ (จำนวน 0.002 กรัม) ตามลำดับ

3.2.7.2 ผลกระทบของอิออนต่างๆต่อการดูดซับคาร์บามาซิปีน

1) เตรียมตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บามาซิปีนความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และเติมอิออนต่างๆ ดังนี้ NaCl (10 และ 20 mM), KCl (10 mM) NaNO₃ (10 mM) Na₂SO₄ (10 mM) Na₂CO₃ (10 mM) CaCl₂ (1 mM) และ MgCl₂ (10 mM) ในหลอดเซนทริฟิวส์

2) จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดผง จำนวน 0.004 กรัม ใส่ลงไปในตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บามาซิปีนความเข้มข้นต่างๆ

3) ควบคุมพีเอชของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (เกลือโซเดียม) และควบคุม ionic strength พื้นฐานให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.6.1

5) กรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วย syringe filter

6) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD

7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 - 6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (จำนวน 0.1 กรัม) และกราฟีนออกไซด์ (จำนวน 0.002 กรัม) ตามลำดับ

3.2.7.3 การดูดซับคาร์บามาซีปีนร่วมกับสารตกค้างจากยาซัลฟาเมทอกซาโซล

- 1) เตรียมตัวอย่างน้ำที่มีคาร์บามาซีปีนความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และเติมยาซัลฟาเมทอกซาโซล ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหลอดเซนทริฟิวส์
- 2) จากนั้นชั่งตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดผง จำนวน 0.004 กรัม ใส่ลงไปในตัวอย่งน้ำที่มีคาร์บามาซีปีนความเข้มข้นต่างๆ
- 3) ควบคุมพีเอชของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.6.1
- 5) กรองแยกตัวกลางดูดซับออกด้วย syringe filter
- 6) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD
- 7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็นถ่านมันต์ชนิดเกล็ด (จำนวน 0.1 กรัม) และกราฟีนออกไซด์ (จำนวน 0.002 กรัม) ตามลำดับ

3.2.8 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้

3.2.8.1 สมการทางจลนพลศาสตร์

- 1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots\dots(3.2)$$

- 2) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \dots\dots(3.3)$$

เมื่อ q_e คือ มวลของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับต่อมวลของ

ตัวกลางดูดซับ ณ จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

q_t คือ มวลของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับต่อมวลของ

ตัวกลางดูดซับ ณ เวลาใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ตามลำดับ

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t)V}{m} \quad \dots\dots(3.4)$$

โดยที่ q_t คือ มวลของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับต่อมวลของตัวกลางดูดซับ ณ เวลาใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

c_0 และ c_t คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น ณ เวลา t ใดๆ ของสารถูกดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

V คือ ปริมาตรของสารละลาย มีหน่วยเป็นลิตร

m คือ มวลของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม

จากการนำข้อมูลมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของคาร์บามาซีปีนคงเหลือในสารละลาย จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่ใช้อธิบายอัตราการดูดซับของกระบวนการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเปรียบเทียบความเหมาะสมโดยค่า R^2

3.2.8.2 สมการไอโซเทอร์ม

1) สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{bc_e}{1+bc_e} \quad \dots\dots(3.5)$$

โดยที่ q_e คือ มวลของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

c_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำ หรือสารละลาย ณ สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น

มิลลิกรัมต่อกรัม

b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ มีหน่วยเป็นลิตรต่อมิลลิกรัม

2) สมการไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Fruendlich)

$$q_e = k_F c_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{.....(3.6)}$$

โดยที่ q_e คือ มวลของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

c_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคน้ำหรือสารละลาย ณ สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

k_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้นของ Freundlich มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

$\frac{1}{n}$ คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย ได้จากการทดลอง

จากการนำข้อมูลมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนาซีปีนคิงเหลือในสารละลาย และความสามารถในการดูดซับ ณ จุดสมดุล แล้วหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับโดยพิจารณาจากค่า R^2 ซึ่งในการทดลองจะนำไอโซเทอร์มการดูดซับคาร์บอนาซีปีนที่ได้จากระบบดูดซับเชิงเดี่ยวมาเปรียบเทียบกับไอโซเทอร์มที่ได้จากระบบดูดซับเชิงสารผสมเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไป

3.2.8.3 สมการทางประสิทธิภาพการคัดแยก

$$K_d = \frac{\text{มวลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ}}{\text{มวลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสารละลาย}} = \frac{A_i}{C_i} \quad \text{.....(3.7)}$$

โดยที่ A คือ พื้นผิวการดูดซับที่ว่าง (free or unoccupied surface adsorption sites) มีหน่วยเป็นตารางเมตร

C_i คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ละลายในสารละลาย ณ จุดสมดุล (total dissolved adsorbate remaining in solution at equilibrium) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

A_i คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ ณ จุดสมดุล (amount of adsorbate on the solid at equilibrium)

K_d มีหน่วยเป็นมวลต่อมวล (M/M)

คำนวณประสิทธิภาพการคัดแยกคาร์บอนาซิปีนออกจากน้ำในระบบดูดซับเชิงเดี่ยวและระบบดูดซับเชิงสารผสม แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3.2.8.4 สมการเกี่ยวกับการแพร่

Weber และคณะ (1963) ได้เสนอสมการการแพร่ภายในรูพรุนของตัวกลางดูดซับ ดังนี้

$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad \text{.....(3.8)}$$

โดยที่ q_t คือ มวลของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับต่อมวลของตัวกลางดูดซับ ณ เวลาใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

t คือ เวลาใดๆ หน่วยเป็นนาที

k_i คือ ค่าคงที่การแพร่ผ่าน มีหน่วยเป็น $mg/(g \cdot min^{1/2})$

C คือ จุดตัดแกน Y ซึ่งได้จากการพลอตกราฟระหว่าง q_t และ $t^{1/2}$

นำค่า q_t มาพลอตกับ $t^{1/2}$ เพื่อพิจารณาขึ้นกำหนดอัตราการดูดซับของระบบการดูดซับว่ามีขั้นตอนใดบ้าง ยกตัวอย่างเช่น หากความสัมพันธ์ระหว่าง q_t และ $t^{1/2}$ เป็น

เส้นตรงแสดงว่ามีเพียงการขนส่งภายในรูพรุนเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับในกรณีที่ตัวกลางดูดซับมีรูพรุน หรือมีเพียงการขนส่งภายในชั้นฟิล์มเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับในกรณีที่ตัวกลางดูดซับไม่มีรูพรุน เป็นต้น

3.2.8.5 สมการการถ่ายเทมวลสาร

ตัวกลางดูดซับมีฟิล์มน้ำซึ่งตัวถูกดูดซับต้องเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มนั้น การถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในชั้นฟิล์มและในสารละลายมีความเข้มข้นต่างกัน ในช่วงแรกความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายสูงกว่าความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในชั้นฟิล์ม อนุภาคของตัวถูกดูดซับจึงแพร่จากสารละลายเข้าสู่ชั้นฟิล์ม ถ้าแรงต้านการถ่ายเทมวลสารลดลง ตัวถูกดูดซับจะสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มได้ง่ายขึ้น การถ่ายเทมวลสารในชั้นฟิล์มสามารถเขียนกฎอัตราเรียกว่า Linear driving force ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = k_f S_0 (c - c_i) \quad \text{.....(3.9)}$$

โดยที่ \bar{q} คือ ปริมาณมวลสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

c คือ ความเข้มข้นมวลสารในตัวทำละลายภายนอกชั้นฟิล์ม มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

c_i คือ ความเข้มข้นมวลสารในชั้นฟิล์ม มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

S_0 คือ พื้นที่ผิวของอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ตัวกลางดูดซับ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม

k_f คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นฟิล์ม มีหน่วยเป็นเมตรต่อนาที

การถ่ายเทมวลสารผ่านรูพรุนสามารถอธิบายด้วย homogeneous solid diffusion model ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการแพร่ในทรงกลมโดยมีค่าการแพร่ D_s เท่ากันทุกจุดบนตัวกลางดูดซับ ดังสมการ

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad \text{.....(3.10)}$$

r คือ ระยะทางในแนวรัศมี มีหน่วยเป็นเมตร

D_S คือ ค่าคงที่การกระจาย มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อนาที

Crank (1956) ได้เสนอการแก้สมการ 3.10 โดยตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคตัวกลางตั้งต้นไม่มีมวลสารในอนุภาคเลย ดังนั้น สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{\bar{q}}{q_\infty} = 6 \left(\frac{D_S t}{R^2} \right)^{1/2} [\pi^{1/2} + L] \quad \dots\dots(3.11)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\frac{\bar{q}}{q_\infty}$ และ $t^{1/2}$ จะได้ Slope = $6 \left(\frac{D_S}{R^2} \right)^{1/2}$ จะสามารถคำนวณ หา D_S ได้ โดย q_∞ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวกลางดูดซับที่เวลาอนันต์

การแพร่จากชั้นฟิล์มเข้าสู่ตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง สามารถเขียนกฎอัตรา ได้ดังสมการโดยที่

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = K_S S_0 (q_e - \bar{q}) \quad \dots\dots(3.12)$$

K_S คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเข้าสู่ชั้นของแข็งโดยรวม (overall solid-phase mass transfer coefficient) และ q_e คือ มวลของสารถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม จากนิยามของค่า K_S สามารถสรุปได้

$$\frac{1}{K_S} = \frac{m}{k_f} + \frac{1}{k_s} \quad \dots\dots(3.13)$$

โดยที่ m คือ slope จากการ plot ระหว่าง q และ C ในทำนองเดียวกัน สามารถอธิบายการแพร่ของมวลสารจากสารละลายเข้าสู่ชั้นฟิล์มได้ ด้วยสมการ

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = K_f S_0 (C - C_e) \quad \dots\dots(3.14)$$

โดยที่ K_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเข้าสู่ชั้นฟิล์มของตัวกลางดูดซับ โดยรวม (overall fluid-phase mass transfer coefficient) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ k_f และ k_s ดังสมการ

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{k_f} + \frac{1}{mk_s} \quad \text{.....(3.15)}$$

จากสมการ 3.13 และ 3.15 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง K_s และ K_f ดังนี้

$$K_f = mK_s \quad \text{.....(3.16)}$$

Glueckauf (1955) พบว่า k_s มีความสัมพันธ์กับค่า D_s ดังสมการ 3.17 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากสมการการแพร่และสมการการถ่ายเทมวลสาร มีดังนี้

$$k_s = 5 \frac{D_s}{R} \quad \text{.....(3.17)}$$

ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากสมการการแพร่และสมการการถ่ายเทมวลสาร มีดังนี้

ตารางที่ 3.3 วัตถุประสงค์การศึกษาค่าคงที่และสัมประสิทธิ์และการนำไปประยุกต์ใช้

ตัวแปร	ความหมาย	วัตถุประสงค์การศึกษา/ การนำไปประยุกต์ใช้
D_s	ค่าคงที่การแพร่ในรูพรุน	- หาค่าอัตราการแพร่ภายในรูพรุน
k_s	สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นฟิล์มเข้าสู่ของแข็ง	- เพื่อนำมาคำนวณหาค่า K_s และ K_f ต่อไป
k_f	สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นฟิล์ม	
K_s	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเข้าสู่ชั้นของแข็งโดยรวม	- หาค่าอัตราการแพร่ของมวลสารจากชั้นฟิล์ม น้ำเข้าสู่ตัวกลางดูดซับ
K_f	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเข้าสู่ชั้นฟิล์มของตัวกลางดูดซับโดยรวม	- หาค่าอัตราการแพร่ของมวลสารจากสารละลาย (bulk solution) เข้าสู่ชั้นฟิล์มน้ำ - สามารถนำไปออกแบบการดูดซับแบบคอลัมน์ได้

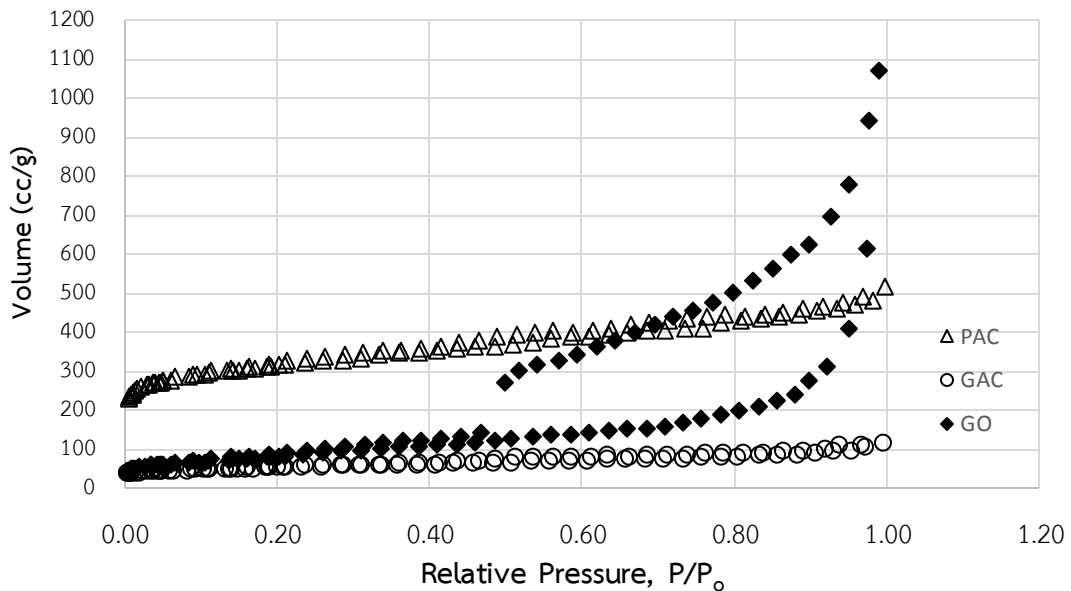
บทที่ 4

ผล และวิเคราะห์ผลงานวิจัย

4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

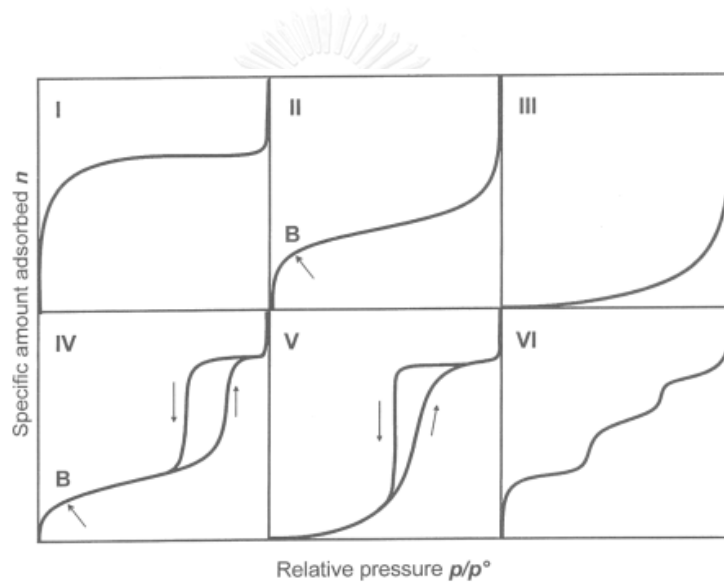
เมื่อนำปริมาณการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนของตัวกลางดูดซับที่อ่านได้จากเครื่อง Autosorb-1 Quantachrome automatic volumetric sorption analyzer มาสร้างกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนได้ดังรูปที่ 4.1 จะสามารถหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมพัทธ์และปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับต่อพื้นที่ตัวกลางดูดซับได้ จากนั้นคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยสมการของ Brunner-Eller-Teller (BET) พบว่า PAC GAC และ GO มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1149.43 175.22 และ 313.99 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนของตัวกลางดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย

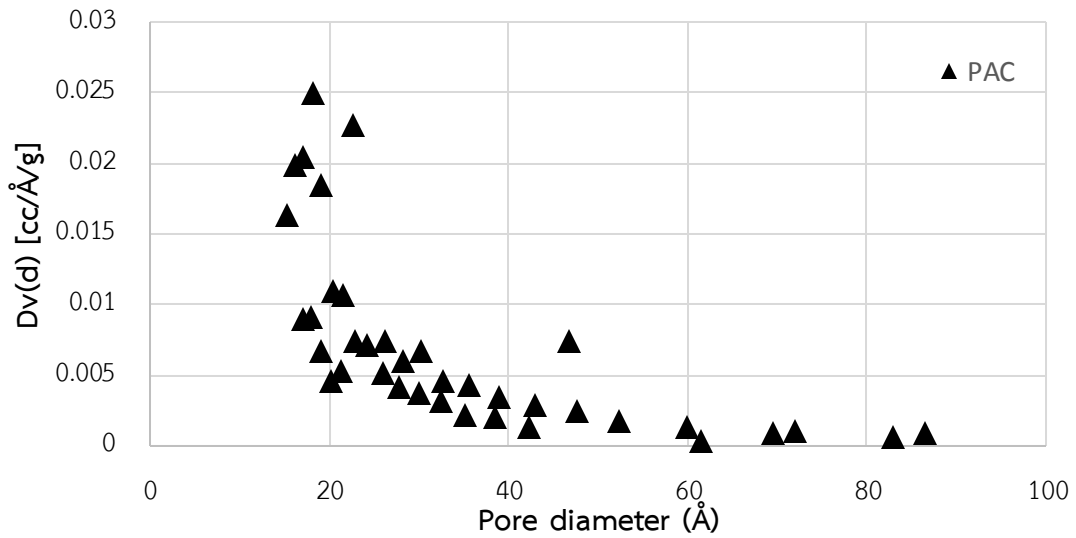
นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.1 พบว่า เส้นไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนของ PAC และ GAC ซ้อนทับกัน และปริมาณการดูดซับก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความดัน

สัมพันธ์ต่ำๆ และมีการดูดซับเพิ่มเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่มักพบในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และจัดเป็นไอโซเทอร์มประเภทที่ 1 (I) ตามการจำแนกประเภทของไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซของ IUPAC (รูปที่ 4.2) แตกต่างกับ ไอโซเทอร์มของ GO ที่เส้นกราฟการดูดซับและคายซับไม่ซ้อนทับกัน จากการเกิดการควบแน่นคาปิลารีในรูพรุน ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) โดยในช่วงความดันสัมพันธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอร์มคล้ายกับไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซประเภทที่ 2 จากนั้นปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพันธ์เพิ่มขึ้น ไอโซเทอร์มดังกล่าวจัดเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซประเภทที่ 4 (IV) ซึ่งพบมากในวัสดุที่รูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง แต่ในความเป็นจริงแล้ว กราฟนี้ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางและเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุน

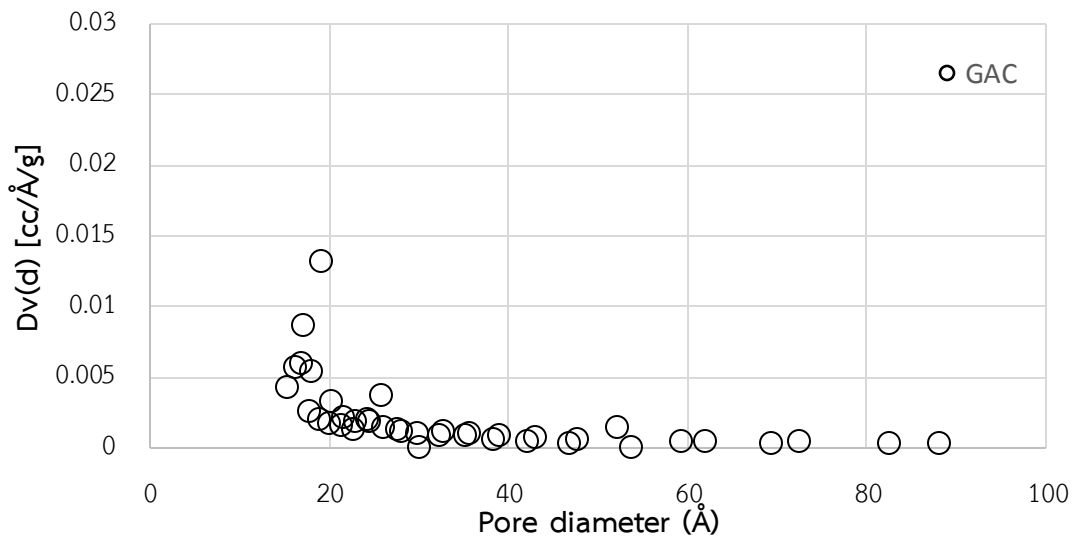


รูปที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซ 6 ประเภท จำแนกตาม IUPAC (Sing, 1982)

สำหรับขนาดและปริมาตรของรูพรุนบนตัวกลางดูดซับนั้น สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) โดยมีพื้นฐานมาจากการทำนายการเกิดการควบแน่นคาปิลารีในการดูดซับและคายซับไนโตรเจน จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่า PAC และ GAC มีการกระจายตัวของรูพรุนที่กว้าง และรูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซของ PAC และ GAC ข้างต้น ทั้งนี้ แม้ว่าตัวกลางดูดซับทั้งสองจะมีการกระจายตัวของรูพรุนที่กว้างเหมือนกัน แต่พบว่า PAC มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กค่อนข้างสูง (น้อยกว่า 20 อังสตรอม) และมีปริมาตรแตกต่างจากปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (20 – 500 อังสตรอม) อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับ GAC ที่ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กไม่สูงเท่ากับ PAC ทั้งยังมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดกลางไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.3 แผนภูมิการกระจายตัวของรูพรุนบน PAC



รูปที่ 4.4 แผนภูมิการกระจายตัวของรูพรุนบน GAC

พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ BET และ BJH ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า PAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า GAC แม้ว่าขนาดอนุภาคและขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะเล็กกว่า GAC ทั้งนี้เนื่องจาก PAC มีปริมาตรรูพรุนมากกว่า GAC และพื้นที่ผิวส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ผิวภายในรูพรุน แต่ไม่สามารถอธิบายในทำนองเดียวกันนี้ได้ในกรณีของ GO เนื่องจาก GO เป็นอนุภาคที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้น ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่หาได้จากการวัดไม่สามารถนำมาอภิปรายได้

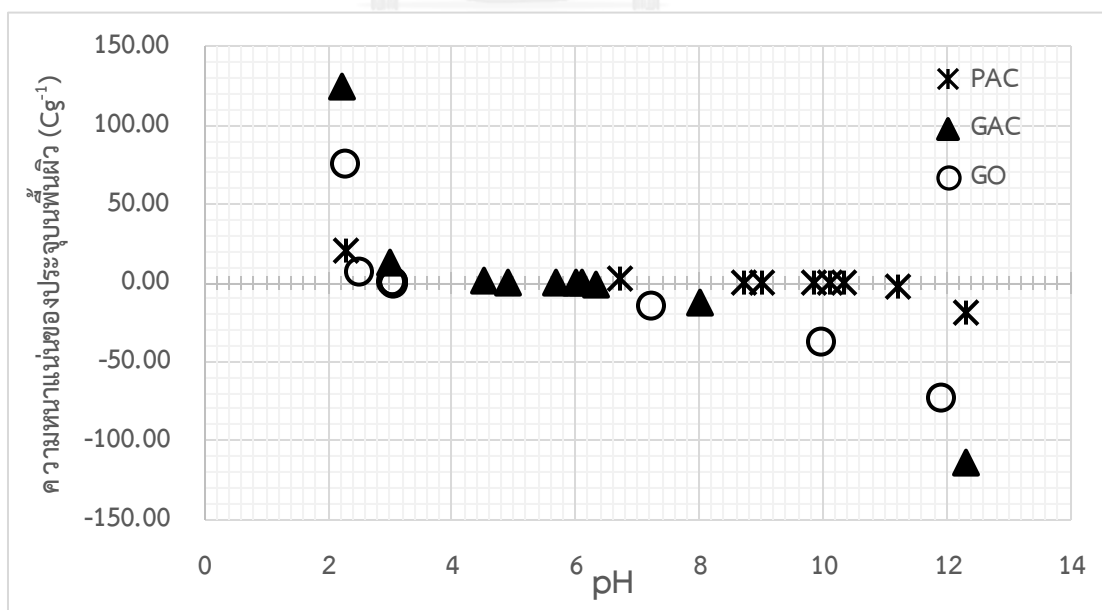
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน
ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

ตัวกลางดูดซับ	ขนาดอนุภาค (mm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Å)	ปริมาตรรูพรุน (mL/g)
PAC	1.90E-06 ^a	1149.43	13.92	0.7998
GAC	2.40	175.22	19.75	0.1731
GO	-	313.99	105.60	1.6580

^a(Prarat และคณะ, 2011)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว

จากการไทเทรตหาประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่พีเอชต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงถึงสภาพความเป็นประจุของพื้นผิวดูดซับที่เปลี่ยนไปตามพีเอช จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชที่ทำให้พื้นผิวมีประจุรวมเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดย pH_{pzc} ของ PAC GAC และ GO เท่ากับ 9.8 6.2 และ 3.1 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังสามารถอภิปรายได้ว่าเมื่อระบบการดูดซับมีค่าพีเอชสูงกว่าค่า pH_{pzc} พื้นผิวของตัวกลางดูดซับจะมีประจุรวมเป็นลบ ในทางกลับกัน พื้นผิวของตัวกลางดูดซับจะประจุรวมเป็นบวกเมื่อค่าพีเอชของระบบการดูดซับต่ำกว่าค่า pH_{pzc}

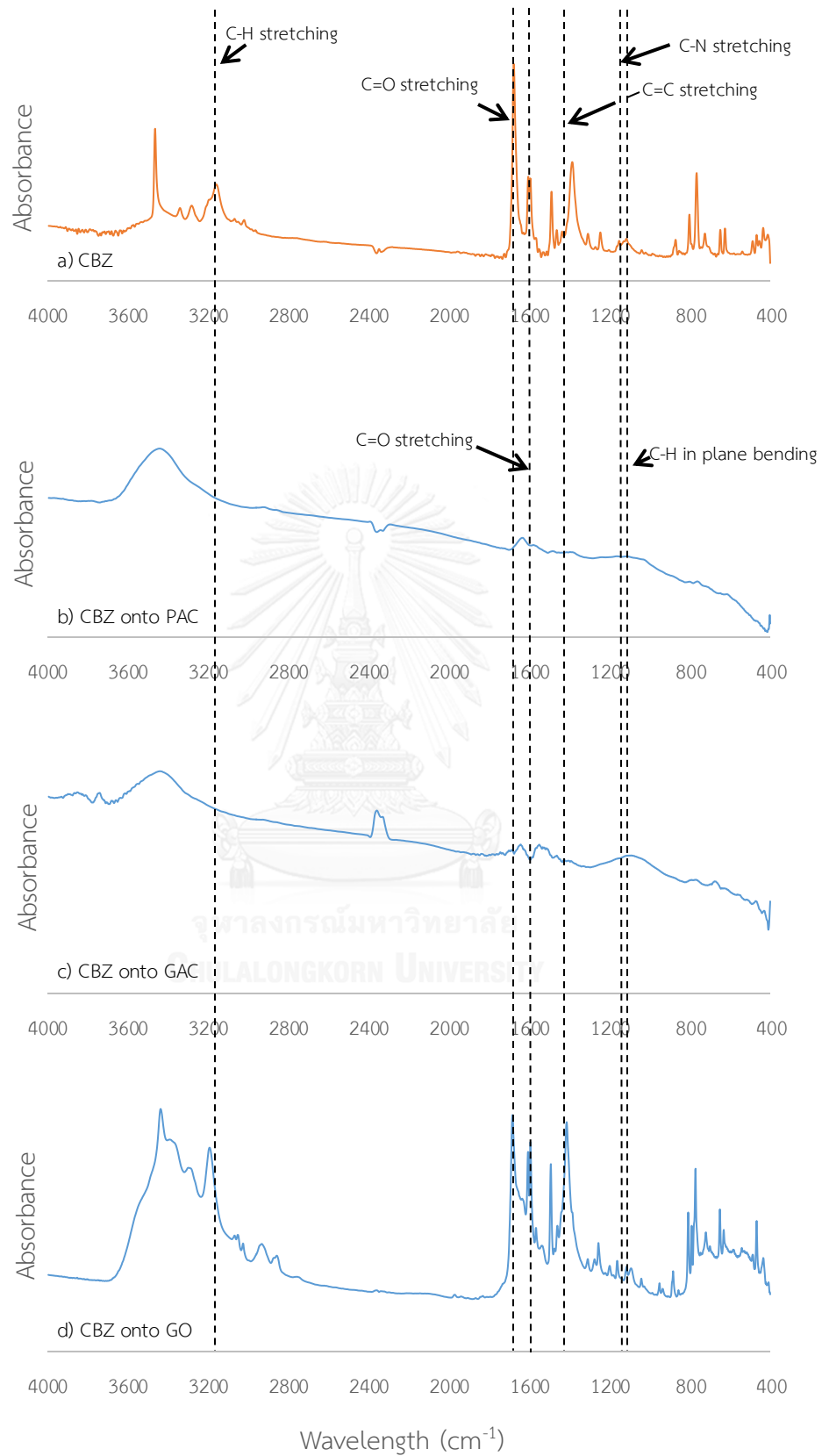


รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของประจุ (surface charge) บนพื้นผิวดูดซับ
(Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

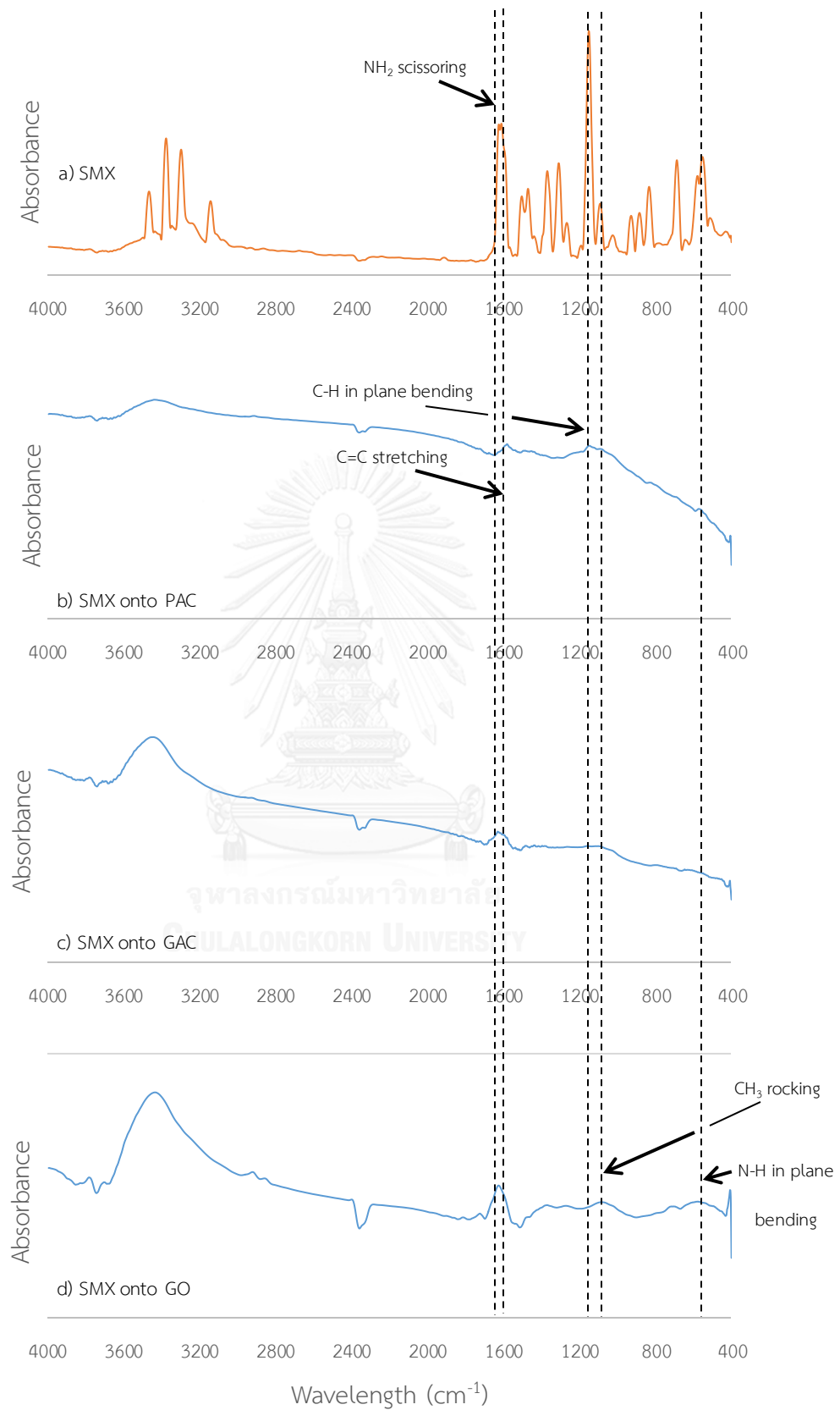
4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของมลสารบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ CBZ SMX และ Tannic ก่อนและหลังการดูดซับ สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) โดยใช้รังสีอินฟราเรดสเปกโตรสโคป ช่วงสเปกตรัม 400-4000 cm^{-1} ในการวัดสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่น การยืด และการงอของพันธะภายในโมเลกุลจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะแตกต่างกันไปตามชนิดหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล จากนั้นนำผล FTIR ของมลสารก่อนและหลังการดูดซับมาเปรียบเทียบ เพื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันของมลสารที่ทำอันตรกริยากับพื้นผิวดูดซับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ FTIR แสดงดังรูปที่ 4.6-4.8

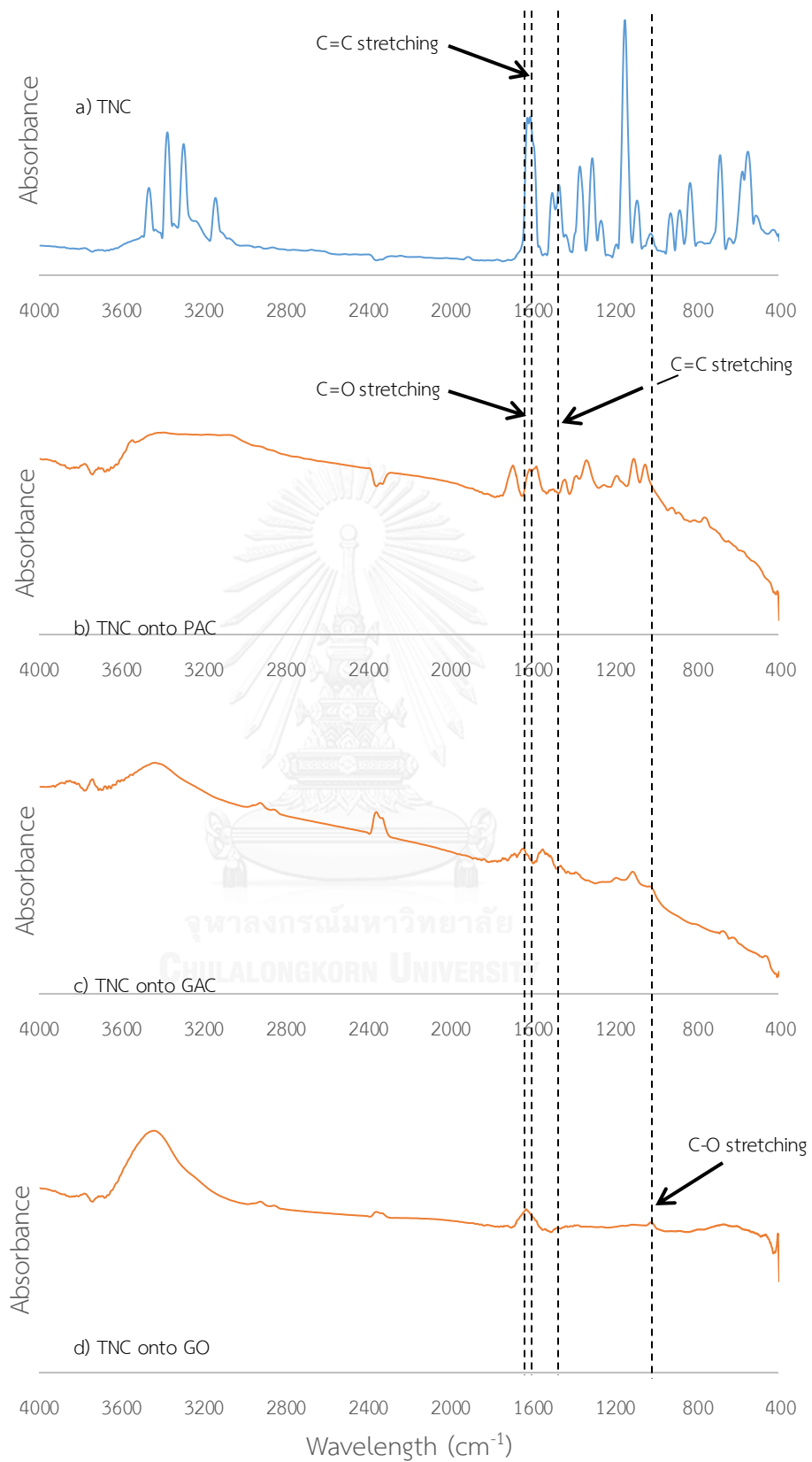




รูปที่ 4.6 สเปกตรัม IR ของ CBZ ก่อนและหลังถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.7 สเปกตรัม IR ของมลสาร SMX ก่อนและหลังถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม IR ของมลสาร TNC ก่อนและหลังถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

จากผลสเปกตรัม IR ดังกล่าวสามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันของมลสารที่ทำอันตรกริยากับ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของมลสารที่ทำอันตรกริยากับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

มลสาร	สารประกอบ	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ที่ปรากฏ (cm^{-1})	ความถี่ของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏ บนตัวกลางดูดซับ (cm^{-1})		
				PAC	GAC	GO
CBZ	เบนซีน	C-H in-plane bending	1116.13 (w)		1091.70 B	1115.05 R
		C=C stretching	1489.45 (m)			1492.97 R
		C=N stretching	1605.22 (m)			1606.72 R
		C-H stretching	3160.39 (m)			3193.81 R
	เอไมด์	C-N stretching	1245.92 (w)			1308.55 R
		NH ₂ rocking	1385.94 (s)			1413.94 R
		N-H bending ของ NH ₂	1594.93 (m)		1550.58 B	1594.45
		C=O stretching	1677.31 (vs)	1633.38 B	1643.19 B	1684.06 R
SMX	เบนซีน	C-H in-plane bending	1144.81 (vs)	1148.17 R		
		C=C stretching	1597.02 (vs)	1581.24 B		
	เอมีน	NH ₂ scissoring	1621.03 (s)		1630.24 R	1625.92 R
	ไฮโดรคาร์บอน	CH ₃ rocking	1092.33 (m)			1081.66 B
	ซัลโฟนาไมด์	N-H in-plane bending	575.89 (s)			576.19 R
Tannic	เบนซีน	C=C stretching	1447.39 (s)	1442.62 B		
		C=C stretching	1611.99 (vs)	1581.50 B	1550.62 B	
	คาร์บอนิล	C=O stretching	1712.24 (vs)	1695.28 B	1643.59 B	1630.96 B
	กลูโคส	C-O stretching	1028.51 (vs)			1021.76 B

คำย่อ : vs = ความเข้มสัญญาณสูงมาก, v = ความเข้มสัญญาณสูง, m = ความเข้มสัญญาณปานกลาง,

w = ความเข้มสัญญาณต่ำ, vw = ความเข้มสัญญาณต่ำมาก

B = blue shift ปรากฏการณ์ที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นลดลง (λ_{max} ลด)

R = red shift ปรากฏการณ์ที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวขึ้น (λ_{max} เพิ่ม)

stretching = การยืด-หด ของพันธะ

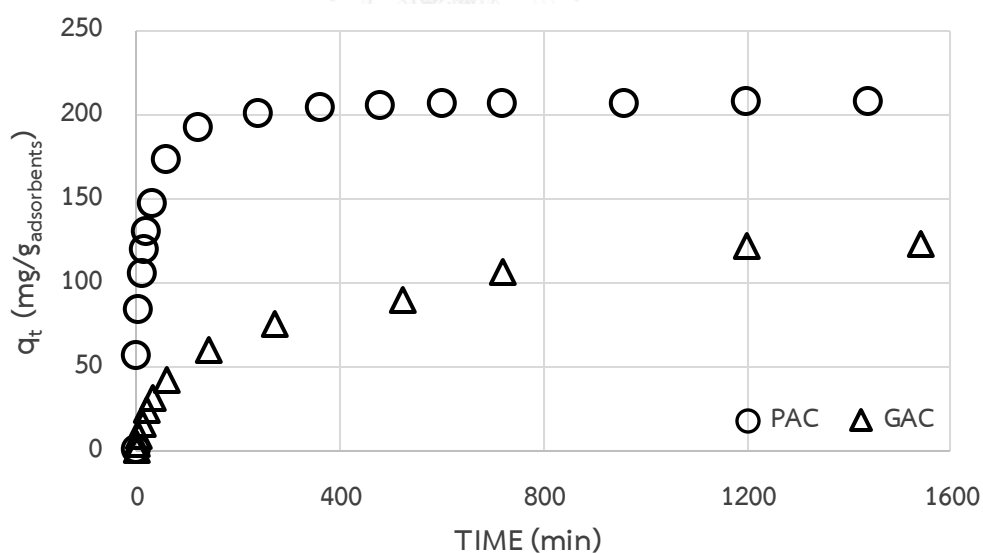
bending = การงอของพันธะ เป็นการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ ซึ่งมีรูปแบบย่อย

ได้แก่ scissoring, rocking twisting หรือ wagging และทั้งหมดนี้อาจเคลื่อนอยู่ในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบ (out-of-plane) ก็ได้

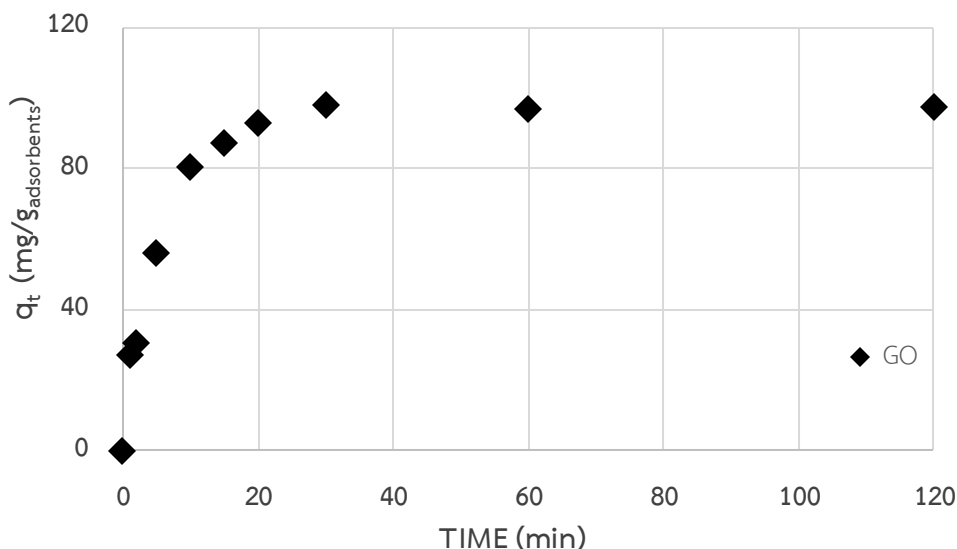
4.2 ผลการศึกษากระบวนการดูดซับเชิงเดี่ยว

4.2.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บามาซิปีนบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ PAC GAC และ GO โดยทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของ CBZ เริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และความแรงประจุ เท่ากับ 0.01 โมลาร์ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับต่อสารละลาย เท่ากับ 0.1 0.25 และ 0.05 กรัมต่อลิตร (PAC GAC และ GO ตามลำดับ) จากการทดลองพบว่า การดูดซับคาร์บามาซิปีนบน GO เข้าสู่สมดุลเร็วที่สุด โดยเข้าสู่สมดุลภายใน 1 ชั่วโมง รองลงมา คือ PAC เข้าสู่สมดุลที่ 8 ชั่วโมง และการดูดซับบน GAC เข้าสู่สมดุลช้าสุดอยู่ที่ 20 ชั่วโมง ทั้งนี้ การดูดซับคาร์บามาซิปีนบนวัสดุทั้งสามเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.9 (ต่อ) จลนพลศาสตร์การดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

เมื่อนำข้อมูลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด มาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน และอันดับที่ 2 เสมือน พบว่า สมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน มีความเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด ค่าตัวแปรที่คำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 นอกจากนี้ สามารถหาอัตราการดูดซับเริ่มต้น (initial adsorption rate; h) ของ CBZ และระยะครึ่งชีวิต (half-life time; $t_{1/2}$) ของ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆได้ ดังตารางที่ 4.4

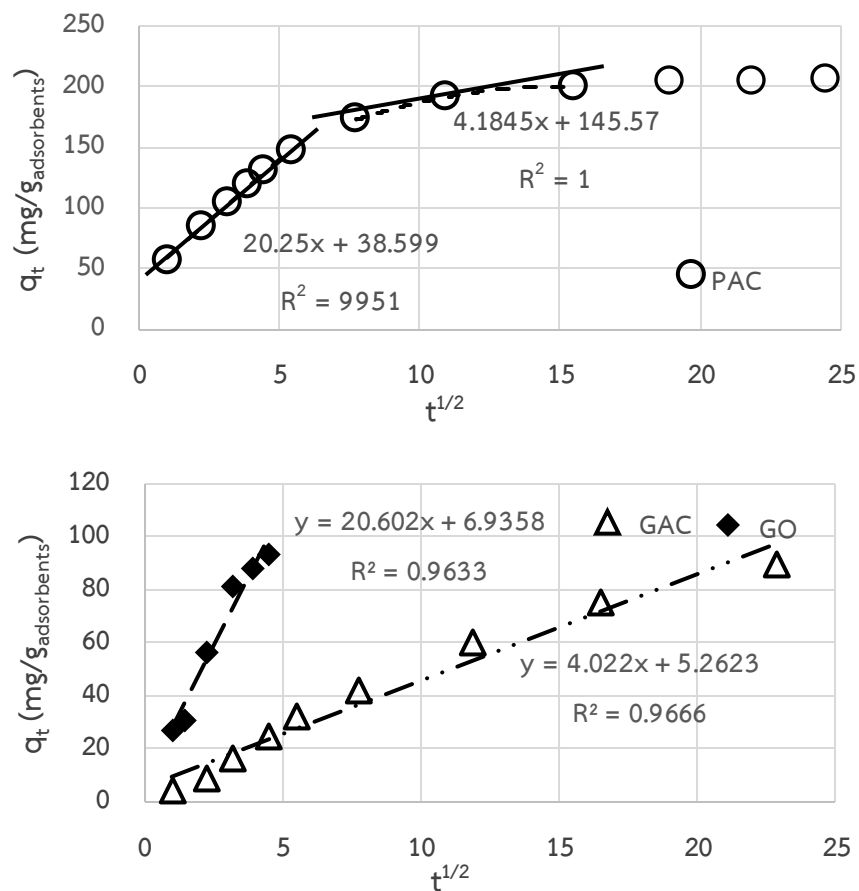
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บามาซิปีน

ตัวดูดซับ	q_e (ทดลอง)	จลนพลศาสตร์ลำดับที่ 1 เสมือน			จลนพลศาสตร์ลำดับที่ 2 เสมือน		
		q_e (มก./ก.)	k_1 (/นาที)	R^2	q_e (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	R^2
PAC	207.7817	78.0189	6.45E-03	0.9180	208.3333	4.79E-04	0.9999
GAC	122.8113	113.8676	3.45E-03	0.9484	125.0000	7.68E-05	0.9779
GO	97.7687	82.7370	1.41E-01	0.9940	98.0392	1.33E-02	0.9994

ตารางที่ 4.4 อัตราการดูดซับเริ่มต้นและระยะครึ่งชีวิตของ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	q_e (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	h (มก./ก.·นาที)	$t_{1/2}$ (นาที)
PAC	207.7817	4.79E-04	20.6799	10.05
GAC	122.8113	7.68E-05	1.1583	106.02
GO	97.7687	1.33E-02	127.1309	0.77

เมื่อนำกราฟพลศาสตร์การดูดซับจากรูปที่ 4.9 มาวิเคราะห์ด้วยสมการการแพร่ของ Weber และ Morris (ดังแสดงในรูป 4.10) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับของตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด พบว่า อัตราการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ PAC เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 อัตรา ก่อนเข้าสู่สมดุล ในขณะที่การดูดซับ CBZ บน GAC และ GO มีอัตราการดูดซับเพียง 1 อัตรา จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล จากความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปยังตัวกลางดูดซับ พบว่า ในช่วงแรกของการดูดซับ CBZ บน PAC นั้น เป็นช่วงที่อนุภาค CBZ แพร่เข้าสู่ผิวหน้าตัวกลางดูดซับ ดังนั้น ขั้นตอนการขนส่งชั้นฟิล์ม (film transfer) จึงเป็นขั้นกำหนดอัตราในช่วงนี้ และต่อมาอัตราการดูดซับช้าลง เนื่องจากในขั้นนี้อนุภาค CBZ ส่วนใหญ่พยายามแทรกตัวเข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับ ดังนั้น ขั้นกำหนดอัตราการดูดซับในขั้นตอนนี้ คือ ขั้นการขนส่งภายในรูพรุน (pore diffusion) สำหรับกระบวนการดูดซับมลสารของ GAC และ GO ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับ ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับโดยการดูดซับ CBZ น่าจะมีเพียงขั้นตอนเดียวตลอดการดูดซับ นั่นคือ ขั้นการขนส่งภายในรูพรุน สำหรับการดูดซับ CBZ ด้วย GAC และขั้นการขนส่งในชั้นฟิล์มสำหรับการดูดซับมลสารของ GO เนื่องจาก GO เป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $t^{1/2}$ และความจุการดูดซับของตัวกลางดูดซับ

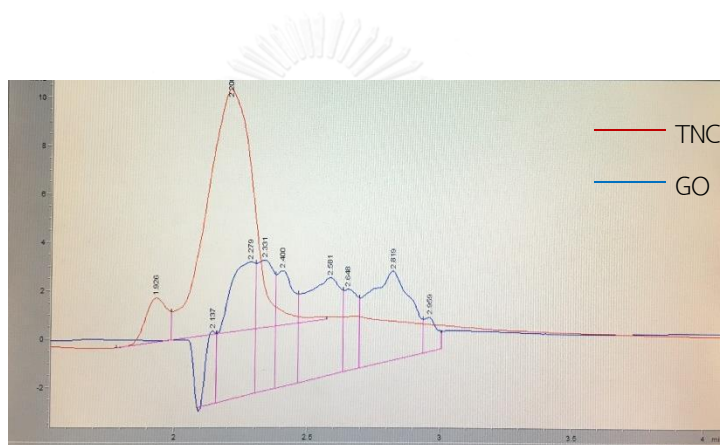
จากการศึกษาและวิเคราะห์กลไกการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ PAC GAC และ GO พบว่า มลสาร CBZ ถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับ GO ในอัตราเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับ PAC และ GAC แม้ว่า GO มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า PAC เนื่องจาก GO เป็นวัสดุดูดซับที่ไม่มีรูพรุน ความต้านทานการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นฟิล์มเท่านั้น จึงทำให้ GO สามารถดูดซับ CBZ และเข้าสู่สมดุอย่างรวดเร็วดังนั้น พื้นที่ผิวจำเพาะไม่สามารถใช้อธิบายอัตราเร็วที่แตกต่างระหว่าง GO และถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุน ซึ่งในที่นี้ คือ PAC และ GAC ได้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการดูดซับของ CBZ บนตัวกลาง PAC และ GAC พบว่า CBZ ถูกดูดซับบน PAC ได้เร็วกว่าบน GAC ทั้งนี้เนื่องจากตัวกลางดูดซับ PAC อนุภาคมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมากกว่า GAC โดยพื้นที่ผิวส่วนมากมาจากพื้นที่ผิวภายในรูพรุน ทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับมลสารมากกว่า และกระบวนการดูดซับมลสารยังเกิดขึ้นภายในรูพรุนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารสู่พื้นผิวของ PAC เร็วกว่า GAC แม้ว่าขนาดรูพรุนของ GAC มีขนาดใหญ่กว่า PAC แต่เนื่องจากขนาดโมเลกุลของ CBZ มีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนบนตัวกลางดูดซับทั้งสอง ทำให้ขนาดของรูพรุนไม่ได้เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับ นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ของ GAC ทำให้การแพร่ของ CBZ เข้าสู่รูพรุนภายในของ GAC ทำได้ยากมากกว่า PAC จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้อัตราการดูดซับของ GAC ช้าที่สุด

4.2.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

4.2.2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเดี่ยวของมลสาร

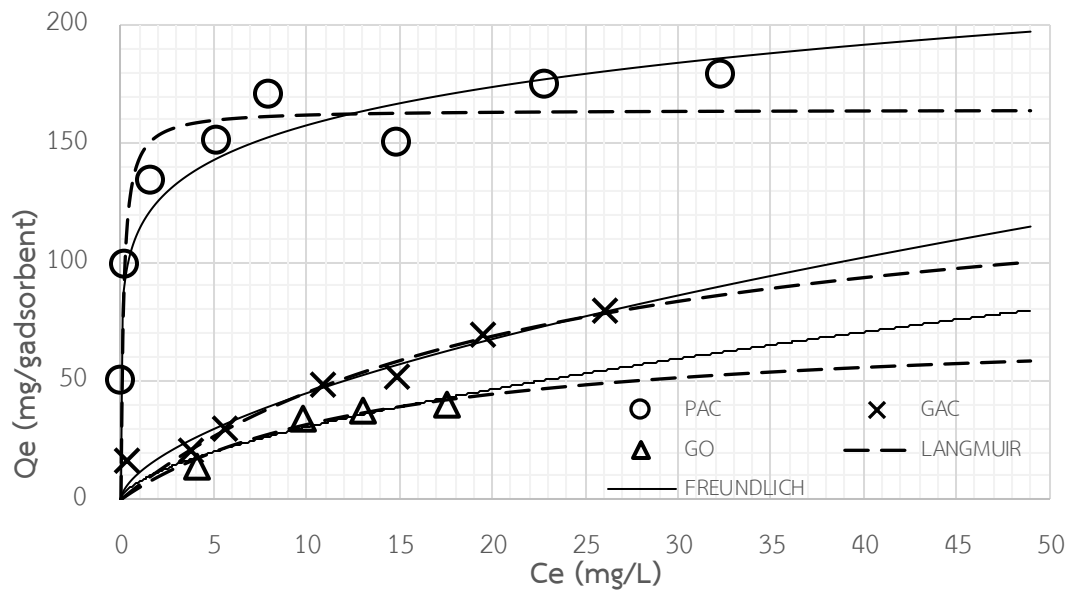
จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเดี่ยวของ CBZ SMX และ Tannic บนตัวกลางดูดซับทั้งสามชนิด (รูปที่ 4.12 - 4.14) พบว่า เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับมลสารเดียวกันบนวัสดุตัวกลางดูดซับต่างชนิดกัน พบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับ CBZ และ SMX ได้ดีกว่า GAC และ GO เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า GAC ซึ่งทำให้มีพื้นที่ที่จะเกิดปฏิสัมพันธ์กับมลสารได้มากกว่า ทำให้ CBZ และ SMX ถูกดูดซับบน PAC ได้ดีกว่า GAC แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ และ SMX กลับพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมลสารทั้งสองของ GO น้อยกว่าของ GAC แม้ว่าพื้นที่ผิวของ GO มากกว่า GAC ทั้งนี้ ในงานวิจัยของ Cai และคณะ (2014) อภิปรายไว้เช่นเดียวกันว่า มีเพียง GO ที่มีพื้นที่ 771 ตารางเมตรต่อกรัมเท่านั้นที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่า GAC และคาดว่า การดูดซับของ CBZ บนตัวกลาง GO น่าจะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ CBZ ที่เป็นแบบ non-planar orientation หรืออาจเป็นเพราะพื้นที่ผิวจำเพาะที่แท้จริงของ GO ไม่สามารถหาได้จากการวัด BET

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับของ Tannic บนตัวกลางดูดซับ ทั้ง 3 ชนิด พบว่า Tannic ถูกดูดซับด้วย PAC ได้ดีกว่า GAC ซึ่งจากโครงสร้างโมเลกุลของ Tannic ที่มีขนาดใหญ่ และคาดว่าใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนโดยส่วนใหญ่ของตัวกลางดูดซับทั้งสอง ดังนั้น Tannic น่าจะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวภายนอกรูพรุนเป็นส่วนใหญ่ แต่ PAC สามารถดูดซับ Tannic ได้มากกว่า GAC มาจาก PAC มีปริมาตรรูพรุนมากกว่า GAC ดังนั้น PAC จึงมีพื้นที่สัมผัสกับ Tannic ที่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้มากกว่า GAC แต่จากการศึกษาการดูดซับ Tannic บนตัวกลางดูดซับ GO ดังรูป 4.11 พบว่า ไม่สามารถแยกโครมาโตแกรมระหว่าง GO และ Tannic ออกจากกันได้อย่าง ชัดเจนและยังมีส่วนที่คาบเกี่ยวกัน จากการทดลองพื้นที่ผิวที่วัดได้หลังการดูดซับกลับมีค่า มากกว่าก่อนการดูดซับ ดังนั้นจึงไม่สามารถบอกได้ว่า Tannic ถูกดูดซับบน GO หรือไม่

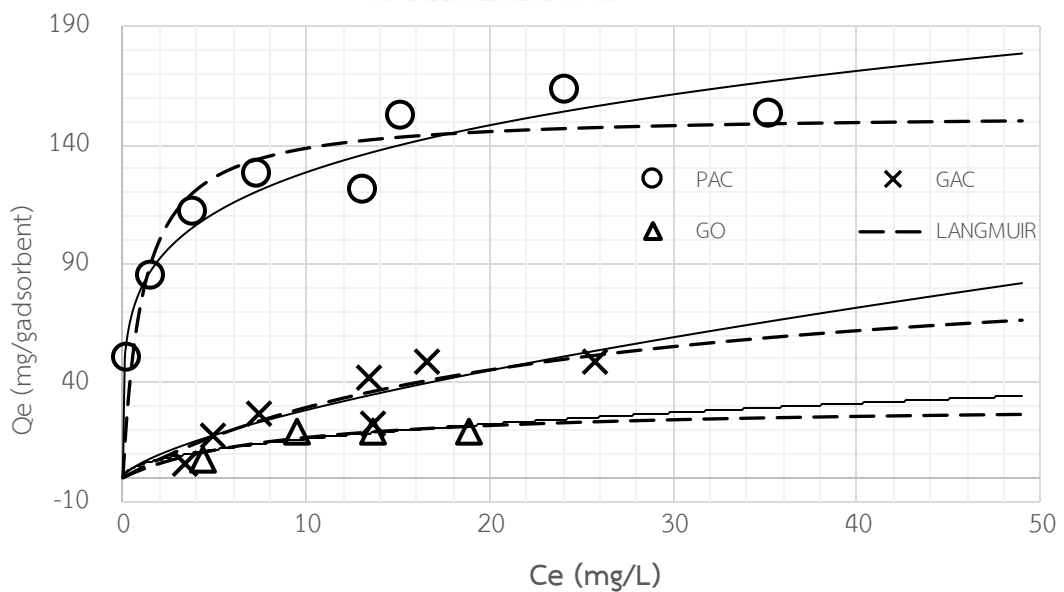


รูปที่ 4.11 โครมาโตแกรมของ Tannic และ GO

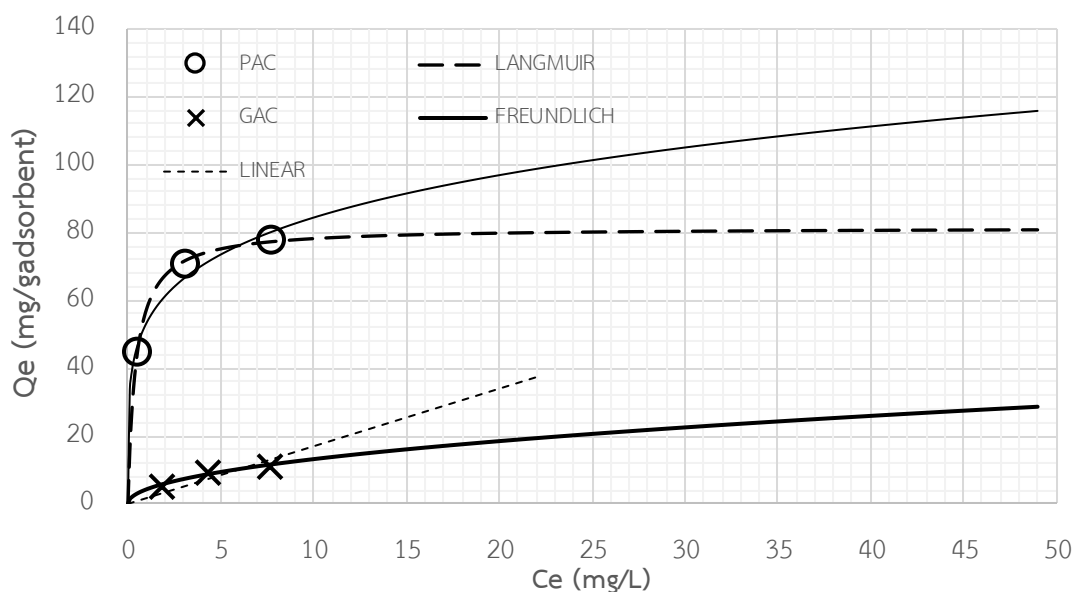
จากไอโซเทอร์มการดูดซับสามารถคำนวณค่าตัวแปรสมการไอโซเทอร์ม แลงเมียร์ และฟรุนดลิช ได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ SMX บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.14 โขเทอร์มการดูดซับของ Tannic บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

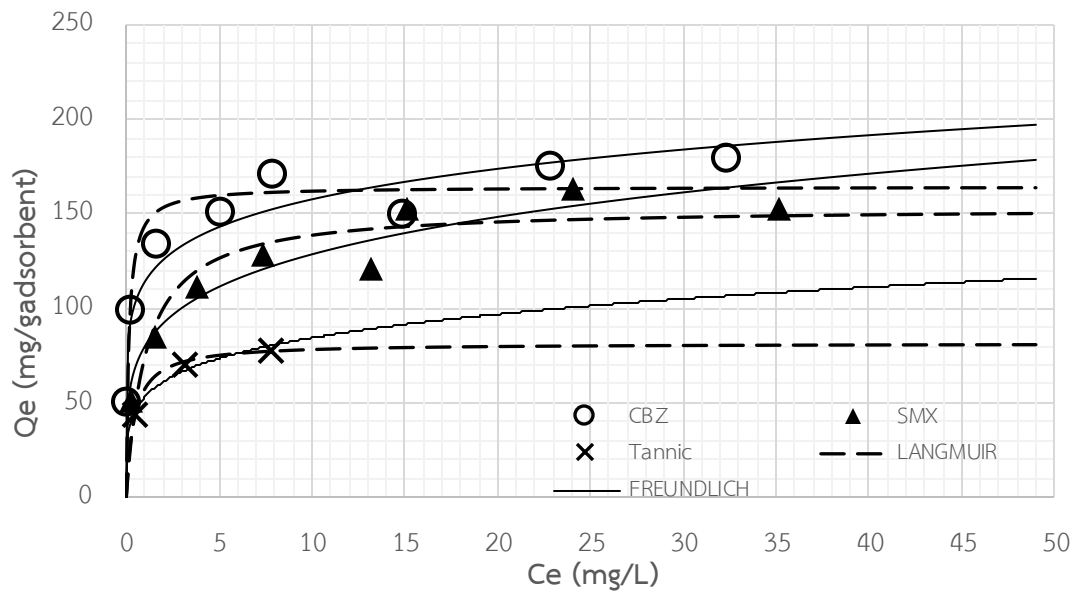
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับเชิงเดี่ยวมวลสารบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

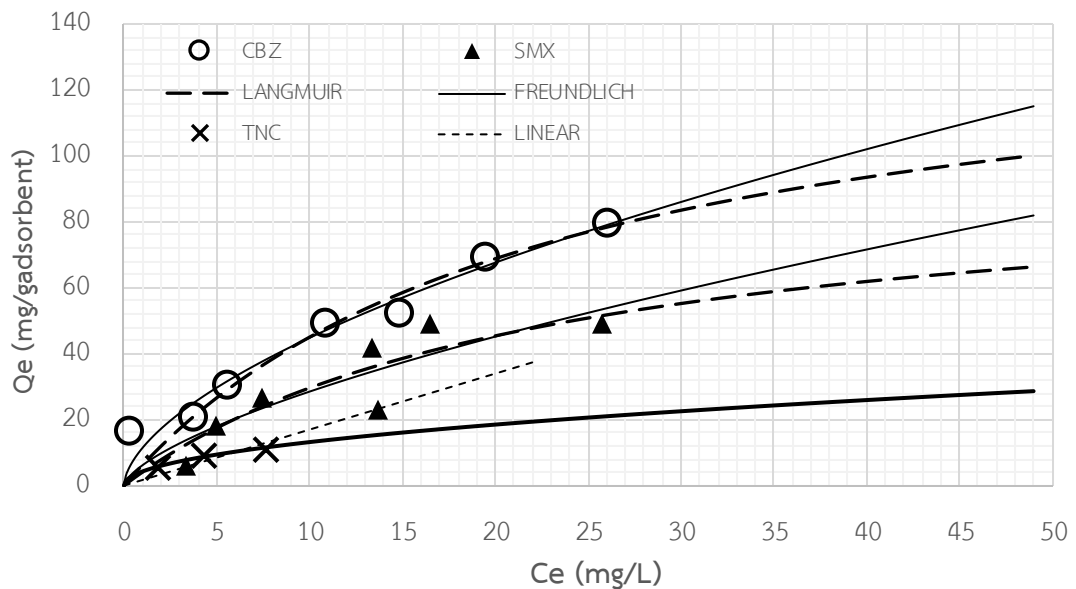
มวลสาร	ตัวกลางดูดซับ	แลงเมียร์				ฟรอนด์ลิช			
		q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	SSD	K_F (มก./ล.)(ล./มก.) ^{1/n}	n	R^2	SSD
CBZ	PAC	164.33	7.02	0.9671	1332.89	114.09	7.11	0.7159	1336.75
	GAC	145.84	0.04	0.6076	258.37	11.43	1.69	0.9857	174.56
	GO	74.64	0.07	0.9787	25.56	7.60	1.65	0.9306	43.32
SMX	PAC	153.48	0.94	0.9232	1440.81	79.90	4.84	0.7311	819.49
	GAC	97.24	0.04	0.7203	339.03	6.17	1.51	0.7995	377.94
	GO	31.26	0.12	0.932	18.37	5.54	2.13	0.8154	26.82
TANNIC	PAC	81.48	2.38	0.6821	1.22	53.33	5.02	0.5492	24.98
	GAC	97.24	0.04	0.8806	212.62	4.29	2.05	0.9667	0.73

จากรูป 4.15 - 4.17 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างมวลสารบนตัวกลางดูดซับชนิดเดียวกัน พบว่า ตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิด PAC GAC และ GO มีความสามารถดูดซับ CBZ มากกว่า SMX ทั้งนี้เนื่องมาจากมวลสาร CBZ มีความไม่ชอบน้ำสูงกว่า SMX จากค่า solubility ของ SMX ที่มากกว่าของ CBZ (Chi Wang และคณะ, 2013) ซึ่งสามารถอธิบายใน

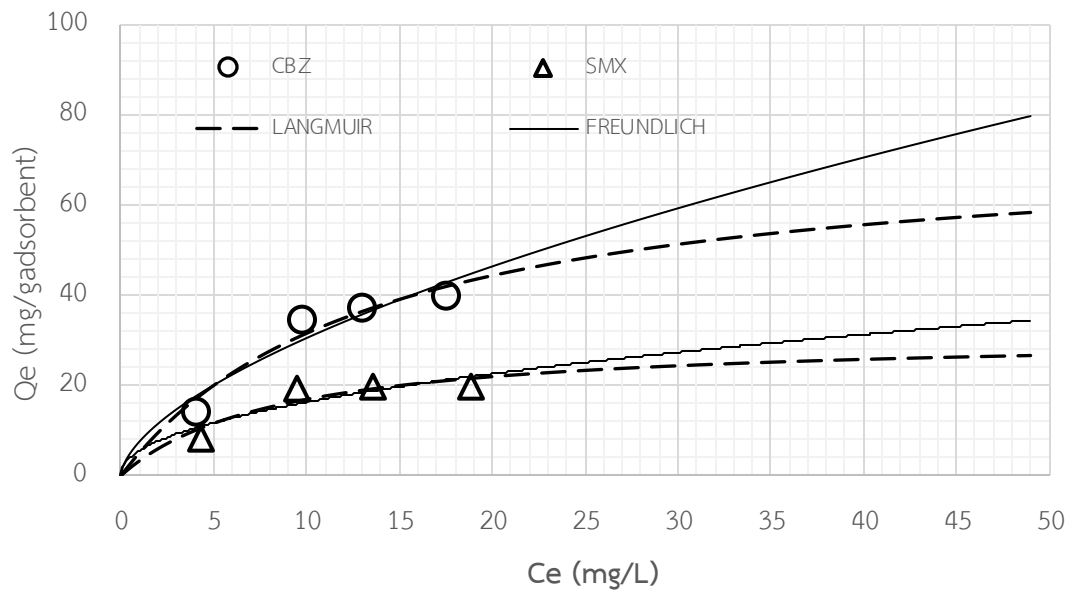
รูปแบบเดียวกัน เมื่อพบว่า Tannic ถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ PAC และ GAC ได้ต่ำกว่ามลสารยาทั้งสอง เนื่องจาก Tannic นั้นมีค่า solubility ที่สูงมากกว่า SMX และ CBZ มากนั่นเอง ทั้งนี้ โมเลกุลของ Tannic ยังมีขนาดใหญ่ส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการดูดซับภายในรูพรุนน้อยกว่า CBZ และ SMX อีกด้วย



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ SMX และ TNC บน PAC
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

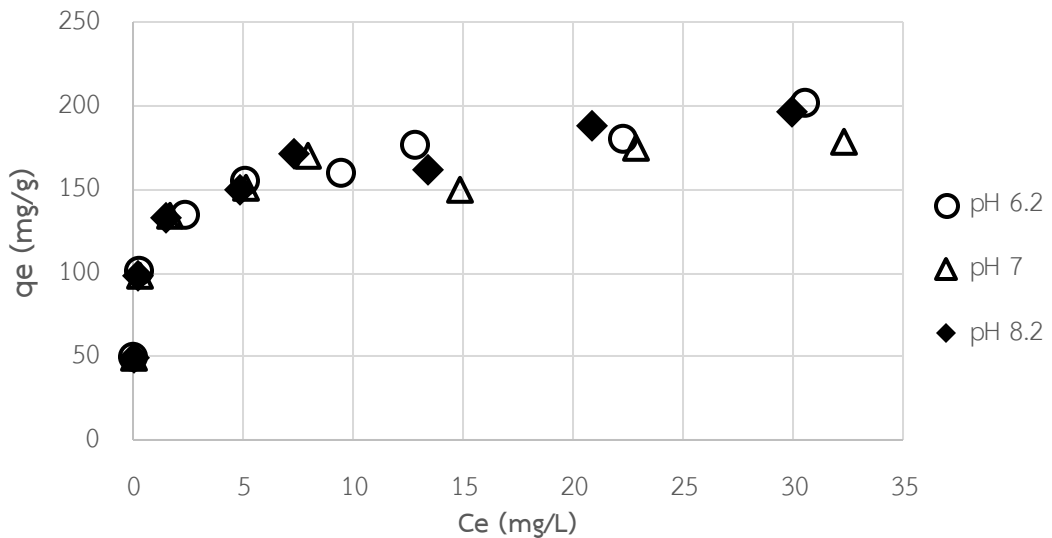


รูปที่ 4.16 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ SMX และ TNC บน GAC
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

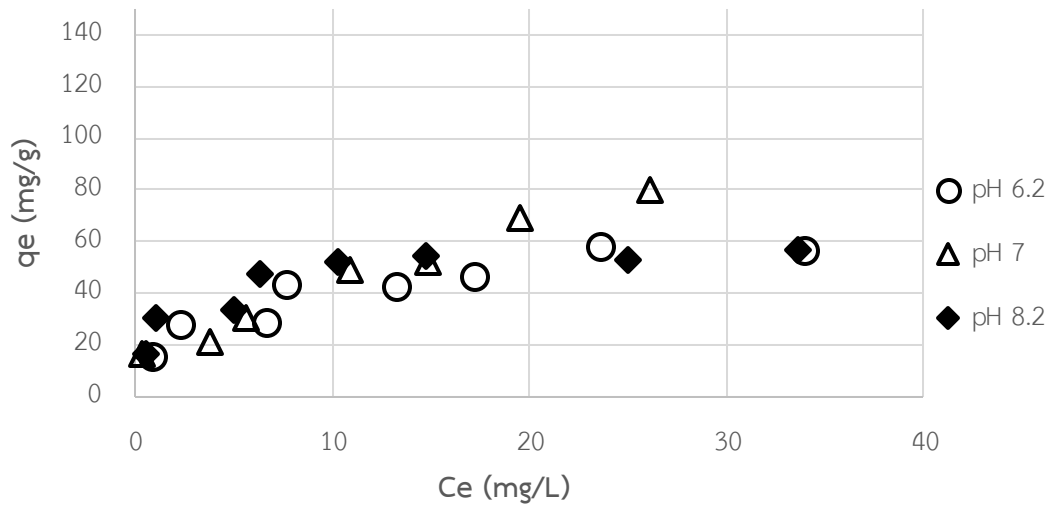


รูปที่ 4.17 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ และ SMX บน GO (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

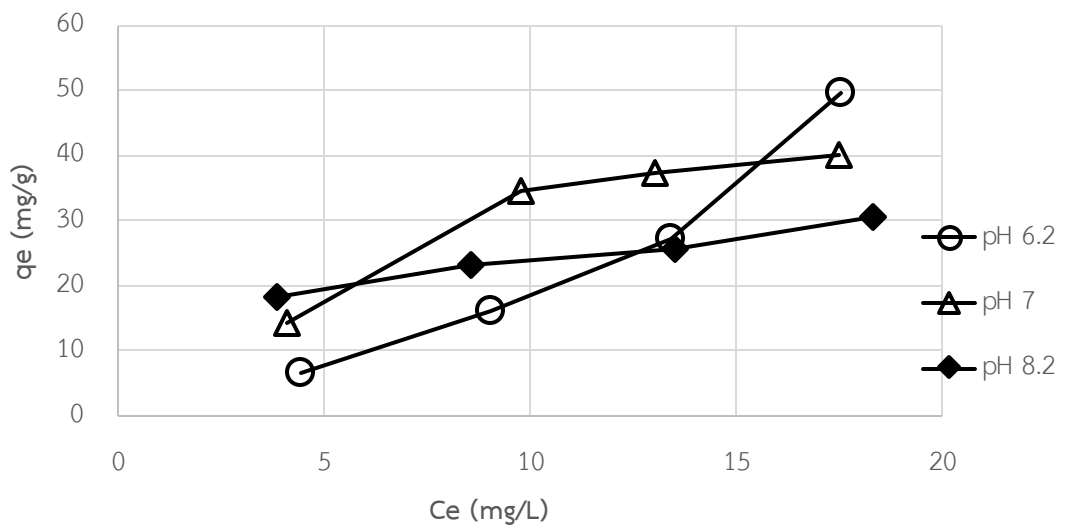
4.2.2.2 ผลการศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน PAC ที่พีเอชต่างๆ (ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน GAC ที่พีเอชต่างๆ
(ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน GO ที่พีเอชต่างๆ
(ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากรูปที่ 4.18 พบว่าการเปลี่ยนพีเอชของระบบไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ PAC ซึ่งในช่วงพีเอชที่ทำการทดลองการดูดซับ (6.2-8.2) พื้นผิว PAC มีประจุรวมเป็นบวก และมีค่าความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวที่ใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในแง่ของตัวถูกดูดซับ CBZ พบว่าในช่วงพีเอชที่ทำการทดลอง CBZ ส่วนใหญ่ไม่แตกตัวเป็นประจุ นั่นหมายถึง การเกิดแรงดูดและแรงผลักทางประจุไฟฟ้าระหว่าง PAC และ CBZ ในแต่ละ

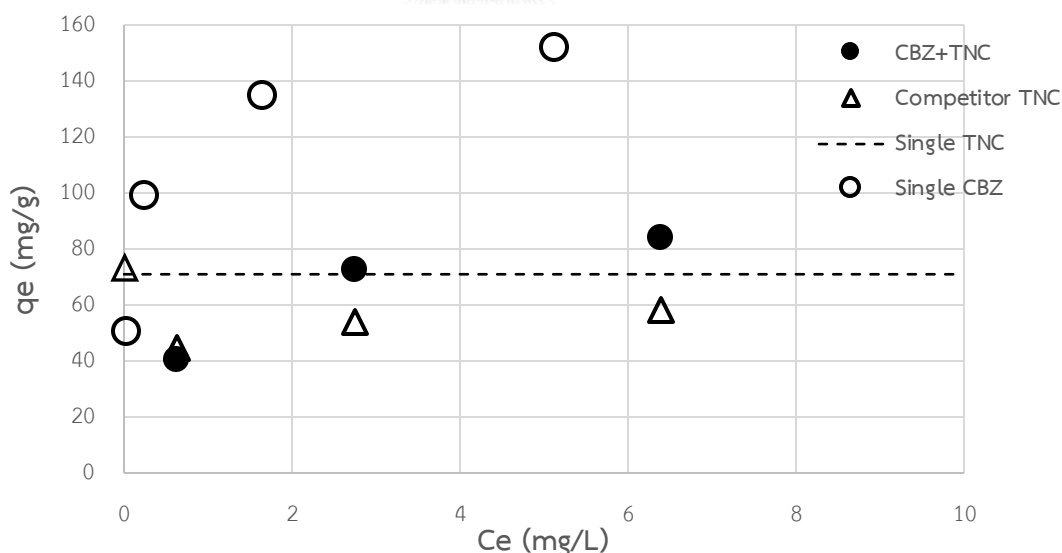
พีเอชไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้การสะสมตัวของ CBZ บน PAC มีปริมาณเท่าๆกัน นอกจากนี้ ยังสามารถอนุมานได้ว่า ในช่วงพีเอชดังกล่าว แรงผลักทางประจุไฟฟ้า (electrostatic force) ไม่ได้เป็นแรงหลักในกระบวนการดูดซับ CBZ บน PAC

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 พบว่า ปรากฏการณ์การดูดซับของ CBZ บนตัวกลางดูดซับ GAC สามารถอธิบายในทางเดียวกันกับ ปรากฏการณ์การดูดซับ CBZ ตัวกลางดูดซับ PAC นั่นคือ ค่าความหนาแน่นประจุบนพื้นผิว GAC ในช่วงพีเอชที่ทำการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ต่างกันตรงที่ประจุรวมบนตัวกลาง GAC มีค่าเป็นลบเนื่องจากค่า pH_{pzc} มีค่าน้อยกว่าพีเอชของระบบการดูดซับในการทดลอง ซึ่งกล่าวได้ว่า แรงผลักทางประจุไฟฟ้า (electrostatic force) ไม่ได้เป็นแรงหลักในปรากฏการณ์ดูดซับ CBZ บน GAC

ทั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยไม่สามารถบอกความแตกต่างของประสิทธิภาพการดูดซับของ CBZ บน GO ในช่วงพีเอชที่ทำการทดลองได้ จากลักษณะเส้นไอโซเทอมที่คาบเกี่ยวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20

4.3 ผลการศึกษากระบวนการดูดซับเชิงสารผสม

4.3.1 ผลการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการดูดซับคาร์บอนาซีปีน

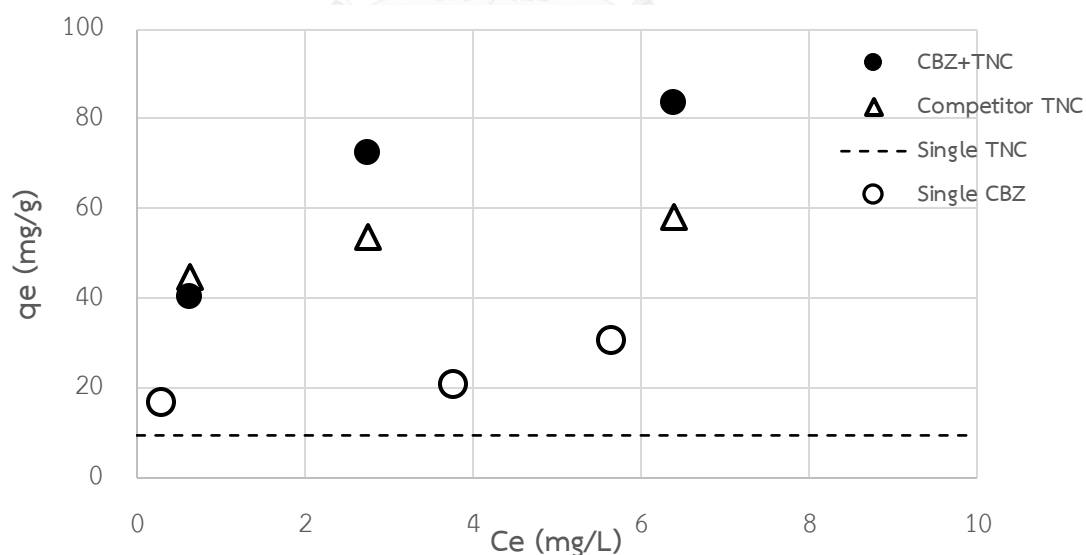


รูปที่ 4.21 ไอโซเทอรัมการดูดซับ CBZ บน PAC ในกรณี Single solute (Single CBZ)

และในกรณีมี Tannic เป็น Competitor (CBZ + TNC)

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากการศึกษาผลกระทบของการมีอยู่ของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ใช้ Tannic เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใส่ Tannic ความเข้มข้นคงที่ เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นอนุภาค CBZ ในช่วง 5 – 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การดูดซับ CBZ ของ PAC มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อมี Tannic อยู่ในระบบดูดซับด้วย ซึ่งในระบบดังกล่าว Tannic ซึ่งเป็นตัว Competitor ของ CBZ ก็ถูกดูดซับได้น้อยลงเมื่อเทียบกับการดูดซับเชิงเดี่ยวของ Tannic (--- single TNC) บนตัวกลางดูดซับ PAC แต่การมีอยู่ของ Tannic ในระบบดูดซับระหว่าง CBZ และ GAC กลับพบว่า นอกจากตัว Tannic เองมีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงขึ้นแล้ว ยังส่งเสริมให้ CBZ ดูดซับบน GAC ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ ในกรณี PAC อาจเนื่องมาจาก Tannic มีความสามารถในการทำปฏิสัมพันธ์กับ CBZ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน Tannic-CBZ ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนโดยส่วนใหญ่ของ PAC ดังนั้น ทั้ง CBZ และ Tannic สามารถเข้าถึงพื้นที่ผิวในรูพรุนได้น้อยลง ประสิทธิภาพการดูดซับจึงลดลง ในขณะที่ GAC มีปริมาณรูพรุนขนาดกลาง (20-500 อังสตรอม) มากกว่า PAC ทำให้สารประกอบเชิงซ้อน Tannic-CBZ สามารถแทรกตัวเข้าไปรูพรุนเหล่านั้นได้ นอกจากนี้ คาดว่าระหว่างสารประกอบเชิงซ้อน Tannic-CBZ ยังสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กันเอง ทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multi-layer) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ และ Tannic ลงบน GAC เพิ่มขึ้น



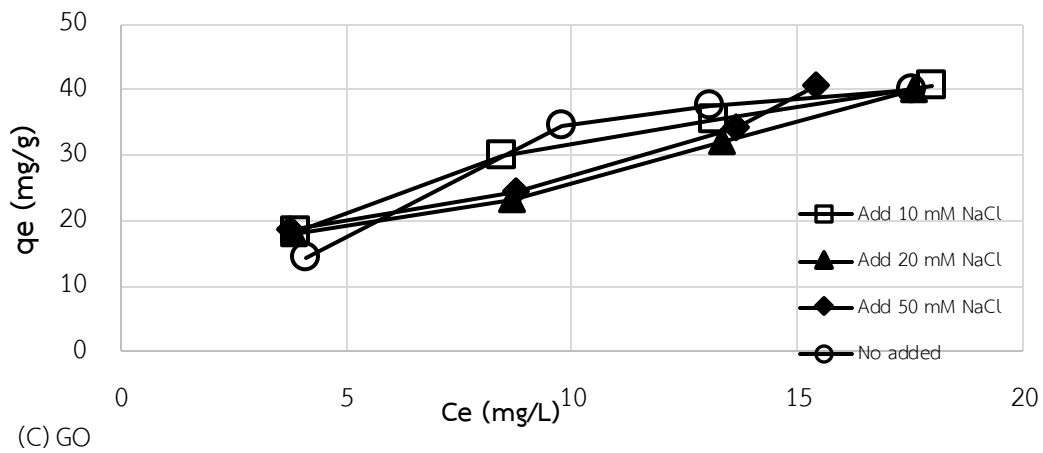
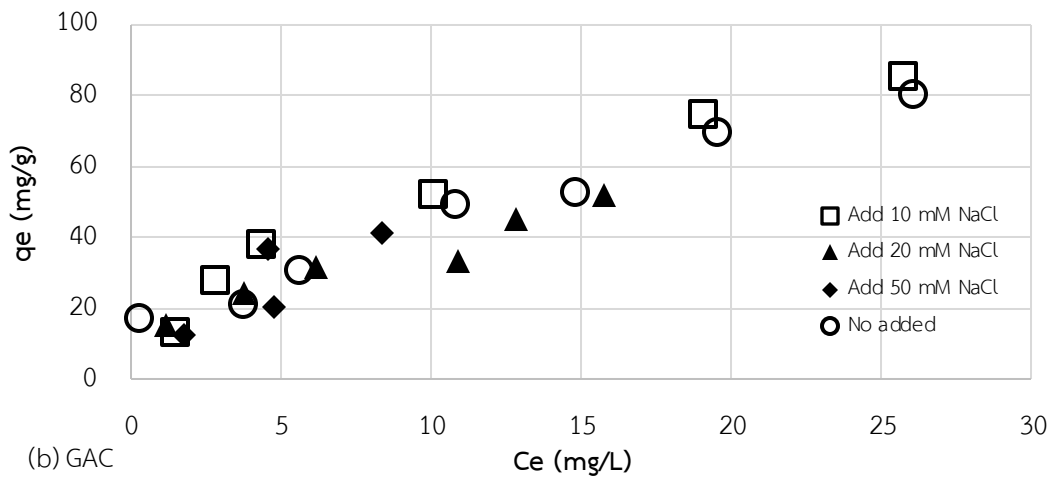
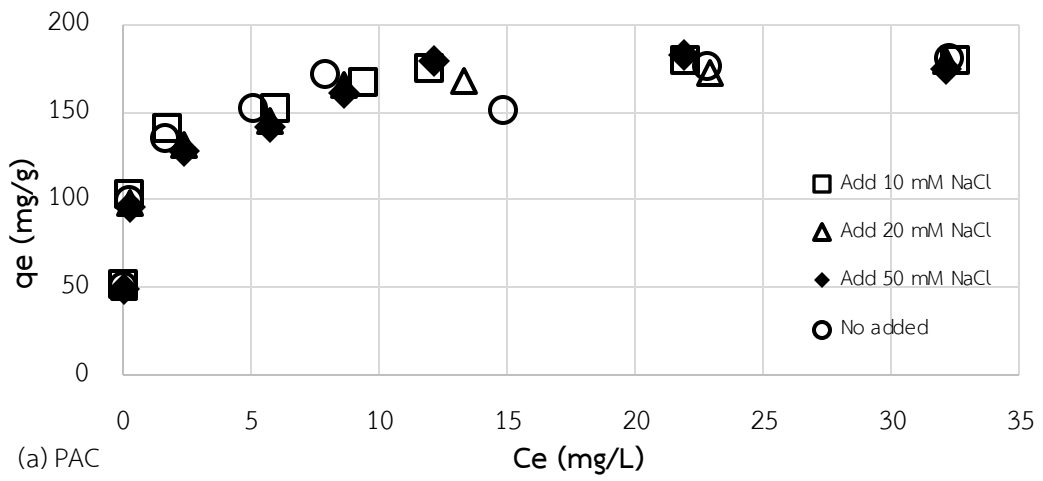
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บน GAC ในกรณี Single solute (Single CBZ) และในกรณีมี Tannic เป็น Competitor (CBZ + TNC)

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.3.2 ผลการศึกษาผลกระทบของไอออนต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บามาซิปีน

ในการศึกษาผลกระทบของไอออนต่างๆ นั้น ผู้วิจัยได้ทดลองผลของค่าความแรงประจุ (ionic strength) ที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาถึงปริมาณไอออนในแต่ละชนิดที่ใส่ในระบบการดูดซับเพื่อทำการศึกษาผลกระทบต่อการดูดซับคาร์บามาซิปีน เนื่องจากไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 และ 2 ถ้าใส่ลงในน้ำด้วยความเข้มข้นที่เท่ากันจะทำให้ค่าความแรงประจุ (ionic strength) ในน้ำไม่เท่ากัน โดยค่าความแรงประจุในน้ำ (ionic strength) ที่เกิดจากไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 นั้นมีค่าเป็น 3 เท่าของค่าความแรงประจุในน้ำ (ionic strength) ที่เกิดจากไอออนที่มีเลขวาเลนซ์เป็น 1 ซึ่งในการทดลองใช้ NaCl ในปริมาณต่างกัน เพื่อใส่ ionic strength เพิ่มลงไปในระบบเดิมที่ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (เกลือโซเดียม) ควบคุม ionic strength เท่ากับ 10 mM โดยปริมาณที่เพิ่ม คือ 10 mM 20 mM และ 50 mM จากนั้นจึงหาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บามาซิปีนบนตัวกลางดูดซับต่างๆ ดังรูป 4.23





รูปที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากการศึกษาข้างต้น พบว่า ค่า ionic strength ที่ไม่เท่ากัน ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บนตัวกลาง PAC และ GAC เปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่สามารถบอกถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน GO ก่อนและภายหลังการเติม ionic strength ด้วย NaCl ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปริมาณการใส่ไอออนต่างๆ ดังตารางที่ 4.6

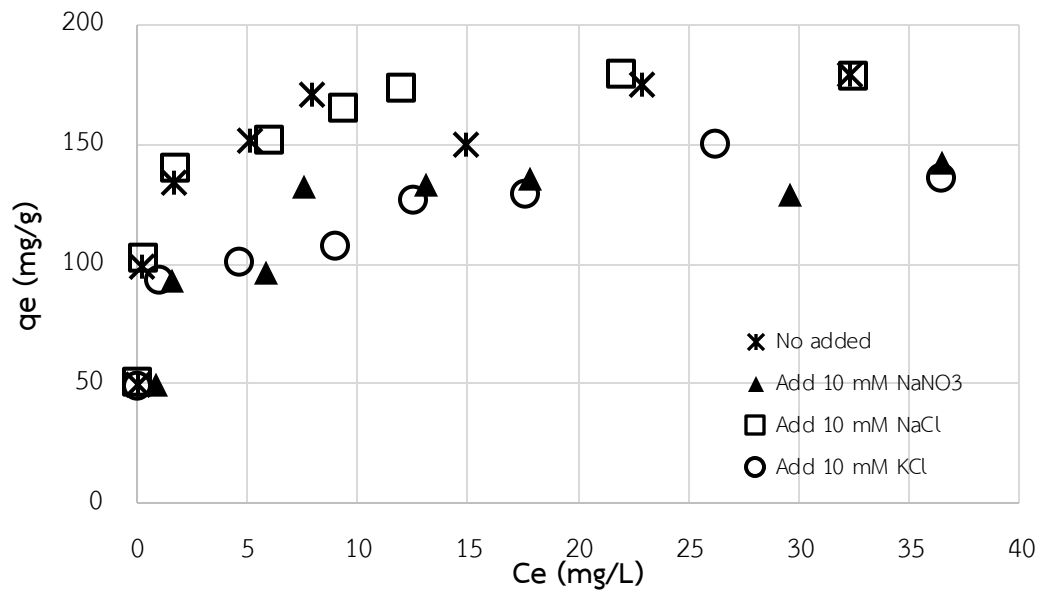
ตารางที่ 4.6 ปริมาณการใส่ไอออนชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ

ชนิดไอออนที่ศึกษา	สารเคมีที่เติม	ปริมาณที่เติม	ตัวควบคุม	หมายเหตุ
Na ⁺	NaCl	10 mM	No added	
K ⁺	KCl	10 mM		
Cl ⁻	NaCl	10 mM	No added	
NO ₃ ⁻	NaNO ₃	10 mM		
CO ₃ ²⁻	Na ₂ CO ₃	10 mM	No added	
SO ₄ ²⁻	Na ₂ SO ₄	10 mM	Add 20 mM NaCl	
Mg ²⁺	MgCl ₂	10 mM	No added	
Ca ²⁺	CaCl ₂ , NaCl	1 mM, 18 mM	Add 20 mM NaCl	

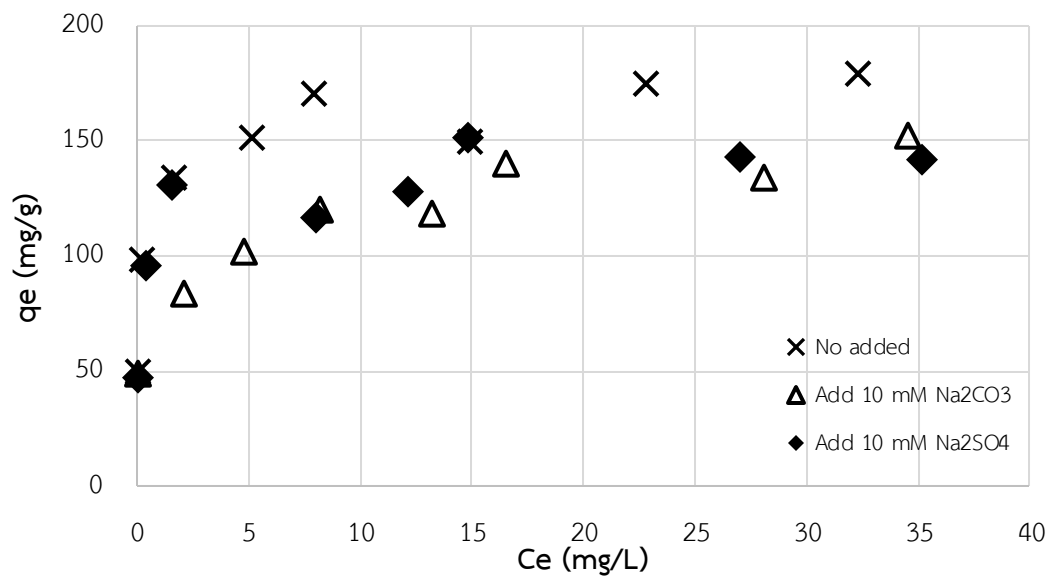
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.2.1 ผลกระทบของไอออนต่างๆต่อการดูดซับคาร์บอนาซีปีนบน PAC

จากการศึกษาผลกระทบของไอออนพบว่า K⁺ และ NO₃⁻ ไอออนบวกและลบที่มีวาเลนซ์ 1 (monovalent cation และ monovalent anion) ที่มีผลกระทบทำให้การดูดซับ CBZ บน PAC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้าม ไอออน Na⁺ และ Cl⁻ กลับไม่มีผลกระทบให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าไอออน K⁺ และไอออน NO₃⁻ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับให้ลดลงใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.24



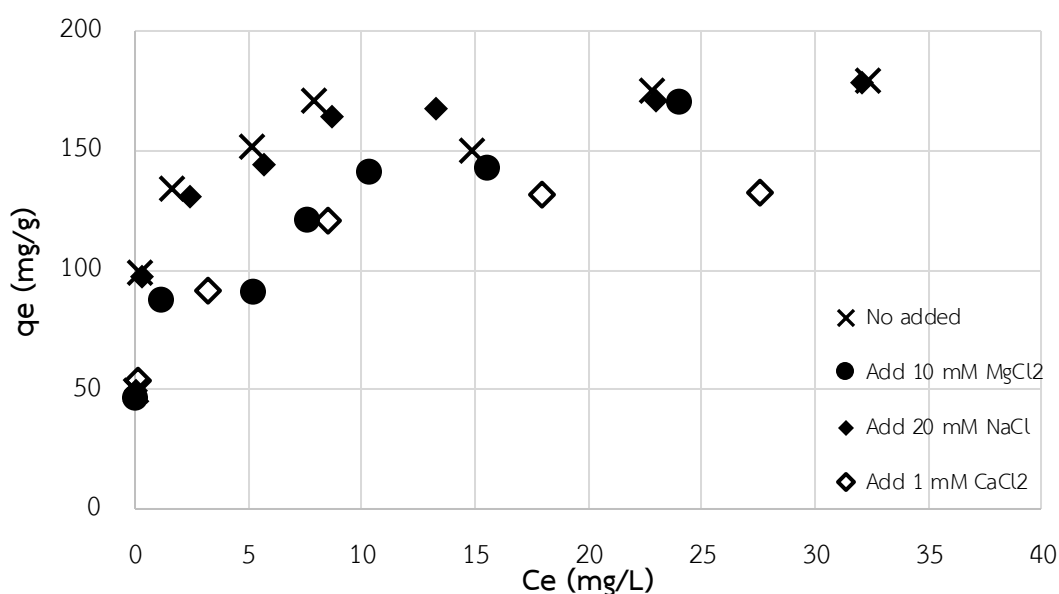
รูปที่ 4.24 ผลของโมโนวาเลนซ์ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.25 ผลของ divalent anion ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน PAC ที่มี CO_3^{2-} และ SO_4^{2-} อยู่ร่วมในระบบ (ดังรูป 4.25) พบว่า CBZ ถูกดูดซับบน PAC น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่า

ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระบบดูดซับร่วมกับ Mg^{2+} พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น CBZ ต่ำ แต่เมื่อความเข้มข้น CBZ สูงขึ้น Mg^{2+} ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ CBZ น้อยลงและประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกับระบบการดูดซับเชิงเดี่ยวของ CBZ จากไอโซเทอร์มการดูดซับร่วม CBZ และ Ca^{2+} ในรูปที่ 4.26 มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งว่า แม้ใส่ไอออน Ca^{2+} ปริมาณไม่สูงมากนักแต่กลับมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน PAC ลดลงอย่างชัดเจนในทุกความเข้มข้นเริ่มต้น CBZ

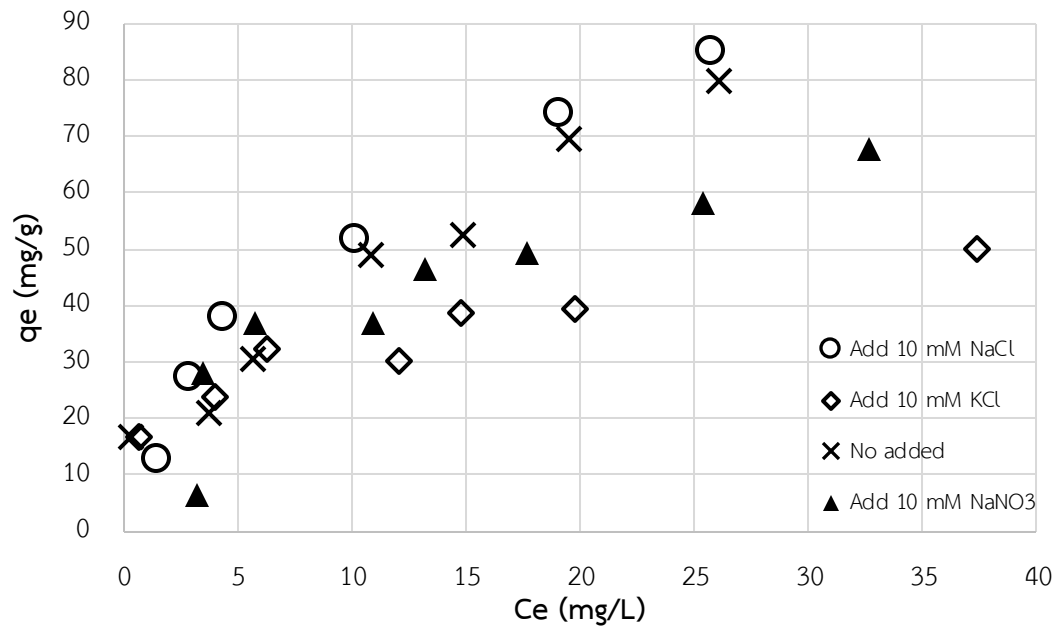


รูปที่ 4.26 ผลของ divalent cation ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ PAC

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

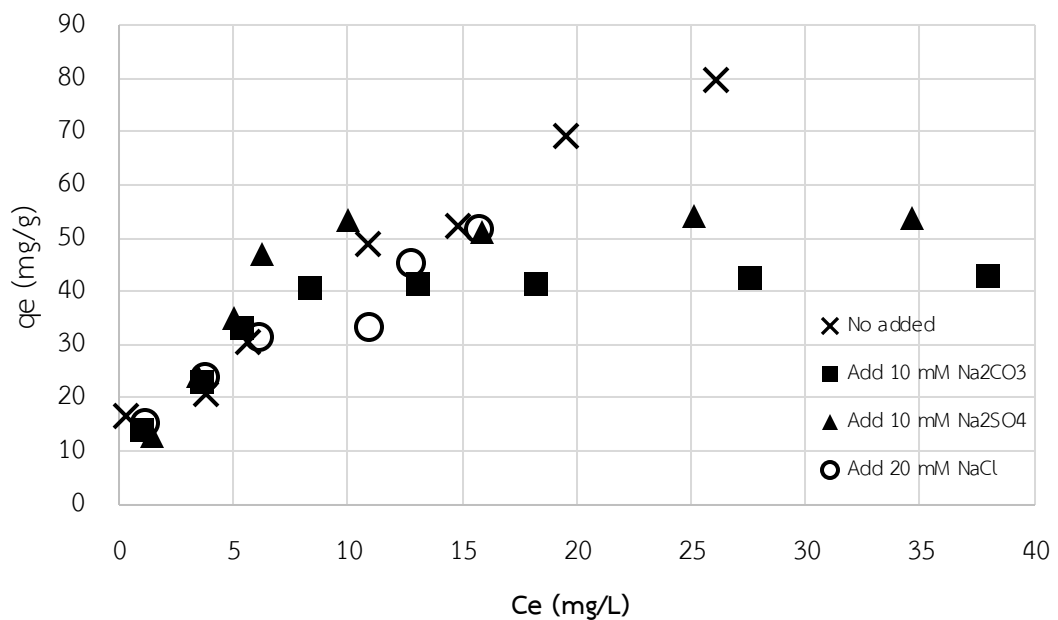
4.3.2.2 ผลกระทบของไอออนต่างๆต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบน GAC

จากการศึกษาผลกระทบของไอออนพบว่า Na^+ และ Cl^- ไม่มีผลกระทบให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน GAC เปลี่ยนแปลงไป แต่การมีอยู่ของ K^+ และ NO_3^- กลับมีผลกระทบทำให้การดูดซับ CBZ บน PAC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดย K^+ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน GAC ลดลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ monovalent อื่นๆที่ใส่ลงในระบบ ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ผลของโมโนวาเลนซ์ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC

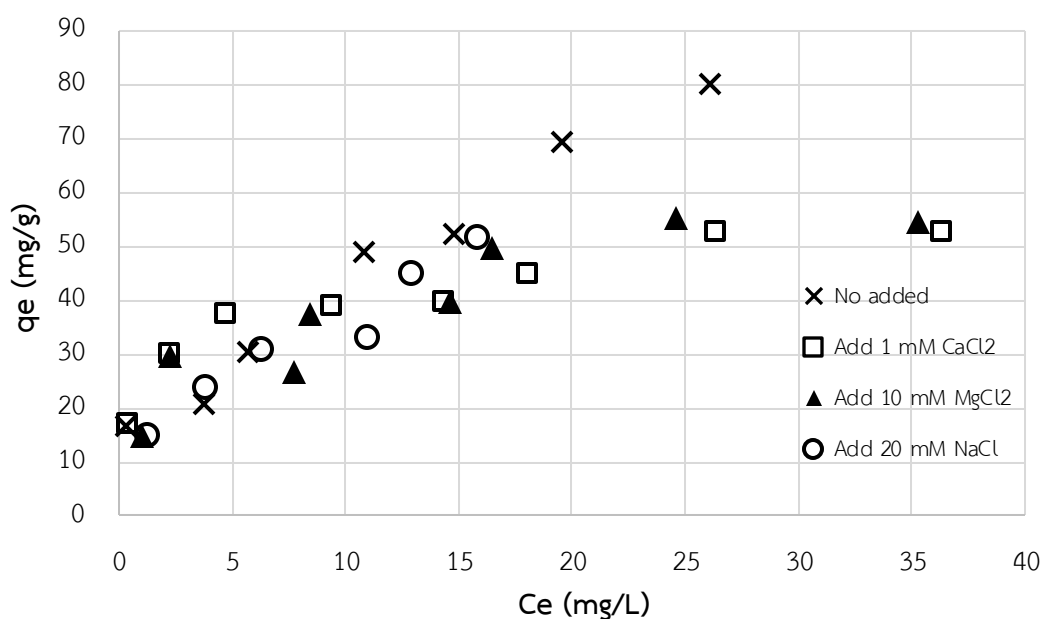
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.28 ผลของ divalent anion ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากรูป 4.28 พบว่า CO_3^{2-} และ SO_4^{2-} ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะเห็นได้ว่า CO_3^{2-} มีส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่า SO_4^{2-} แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC เมื่อมีไอออนประจุบวก 2 (Ca^{2+} หรือ Mg^{2+}) เป็นไอออนร่วมอยู่ในระบบดูดซับ (รูป 4.29) พบว่า GAC มีความสามารถในการดูดซับ CBZ ได้น้อยลงเมื่อความเข้มข้นของ CBZ ในระบบสูงขึ้น โดยมีไอออนทั้งสองส่งผลกระทบต่อการดูดซับของ CBZ บน GAC ที่ใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะใส่ไอออนทั้ง 2 ชนิดในปริมาณที่ไม่เท่ากัน



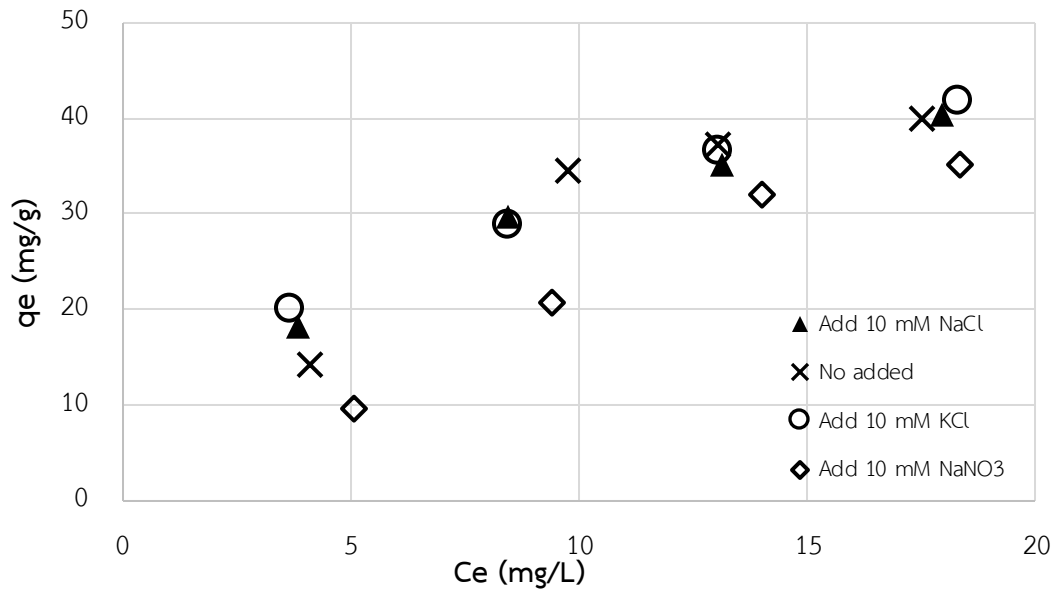
รูปที่ 4.29 ผลของ divalent cation ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.3.2.3 ผลกระทบของไอออนต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบน GO

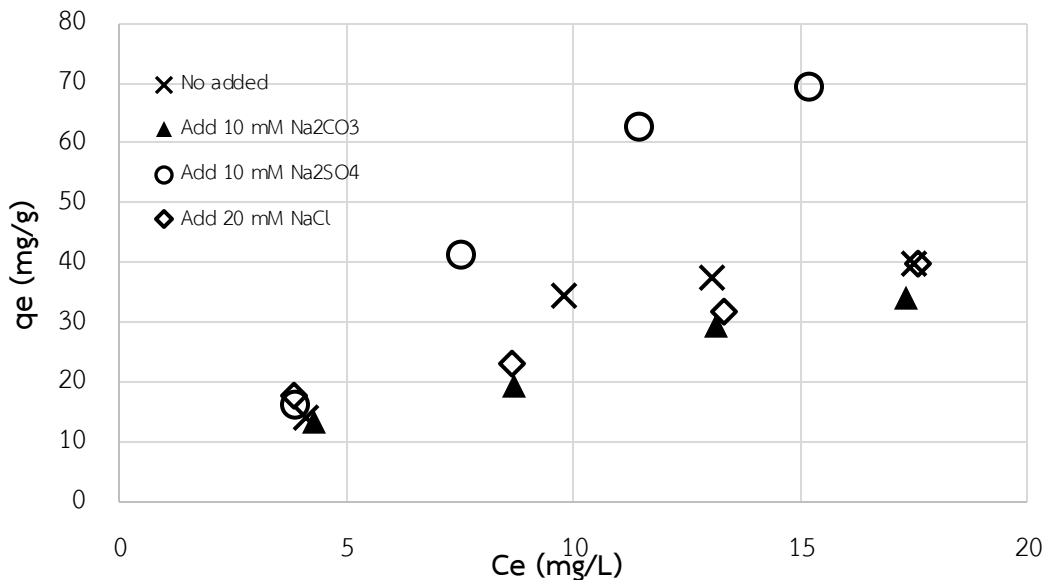
ตัวกลางดูดซับ GO มีผลกระทบที่เกิดจากการอยู่ร่วมของไอออน NO_3^- ในสารผสม ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในระบบดูดซับเชิงสารผสมของ CBZ ร่วมกับ K^+ ไม่มีผลกระทบดังกล่าวจะเห็นได้ว่า การมีหรือไม่มีอยู่ของ K^+ ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GO เปลี่ยนแปลงไป ในขณะเดียวกัน ผู้วิจัยไม่ทราบแน่ชัดว่า Na^+ และ Cl^- ส่งผลต่อการดูดซับ CBZ บน GO หรือไม่ เนื่องจาก เมื่อใส่ NaCl ปริมาณ 10 mM ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ NaCl เป็น 20 และ 50 mM กลับทำให้ GO ดูดซับ CBZ ได้ลดลง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพที่ลดลงก็ไม่สอดคล้องกับปริมาณ NaCl ที่

ใส่เพิ่มระบบ จะเห็นได้จากระบบดูดซับที่มี NaCl ปริมาณ 50 mM GO สามารถดูดซับ CBZ ได้ดีกว่าระบบดูดซับที่มี NaCl ปริมาณ 20 mM ทั้งนี้ จากงานวิจัยของ Moon และคณะ (2015) ได้กล่าวว่า Na^+ ถูกดูดซับบนหมู่ฟังก์ชันอีพอกไซด์และไฮดรอกซิล



รูปที่ 4.30 ผลของโมโนวาเลนซ์ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC

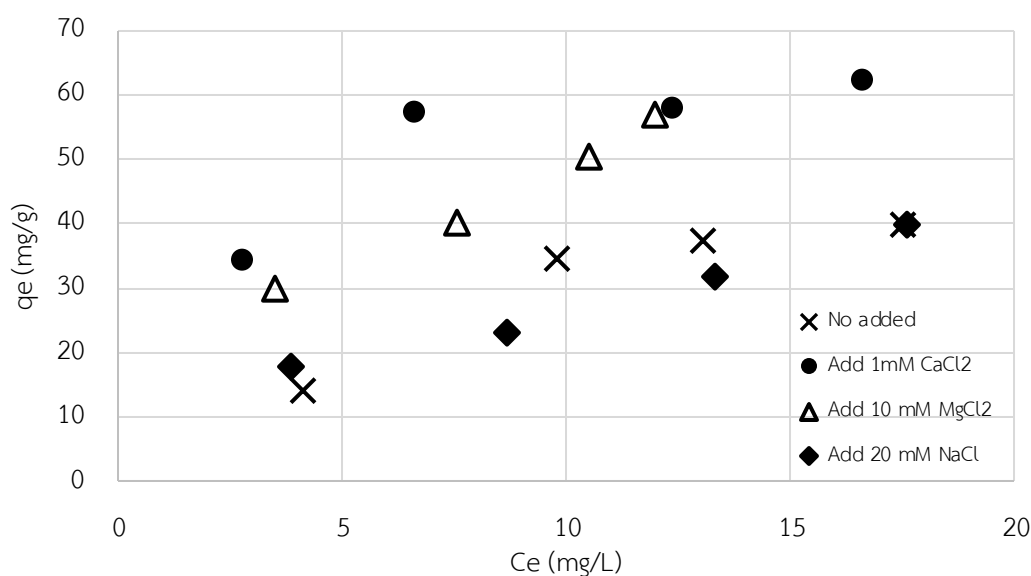
(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.31 ผลของ divalent anion ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GAC

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน GO ของระบบที่มี divalent anion พบว่า CO_3^{2-} และ SO_4^{2-} ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GO อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีทิศทางผลกระทบที่แตกต่างกัน คือ CO_3^{2-} ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CBZ ลดลงเพียงเล็กน้อย และประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกับระบบการดูดซับที่เพิ่ม ionic strength ลงในระบบ 20 mM ทั้งนี้ SO_4^{2-} ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับของ GO ในการดูดซับ CBZ เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.32 ผลของ divalent cation ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ของ GO

(พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตามรูปที่ 4.32 พบว่าการมีอยู่ของไอออน Ca^{2+} หรือ Mg^{2+} ในระบบดูดซับเชิงผสม ส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน GO เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาผลกระทบของไอออนต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บอนมาซิปีน สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปผลกระทบของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับ

ชนิดไอออน	ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ		
	PAC	GAC	GO
Na ⁺	ไม่ส่งผล	ไม่ส่งผล	ไม่สามารถสรุปได้
K ⁺	ลดลง	ลดลง	ไม่ส่งผล
Ca ²⁺	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น
Mg ²⁺	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น
Cl ⁻	ลดลง	ลดลง	ไม่สามารถสรุปได้
NO ₃ ⁻	ลดลง	ลดลง	ลดลง
SO ₄ ²⁻	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น
CO ₃ ²⁻	ลดลง	ลดลง	ลดลง

ทั้งนี้การมีไอออนอยู่ในระบบดูดซับเชิงผสมร่วมกับ CBZ ที่ส่งผลในเชิงส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากไอออนชนิดนั้นเกิดปฏิสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุตรงข้าม ยกตัวอย่างเช่น ไอออน K⁺ เกิดปฏิสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบทำให้พื้นผิวตัวกลางดูดซับมีความเป็นกลางมากยิ่งขึ้น และทำให้ CBZ ถูกดูดซับได้มากขึ้น เนื่องจากที่พีเอชของระบบดูดซับเท่ากับ 7 มลสาร CBZ มีความเป็น neutral ไม่เกิดการแตกตัวเป็นประจุ เพราะ ค่า pK_a ของมลสารเท่ากับ 13.9 หรืออาจเกิดจากการที่ไอออน ทำหน้าที่ bridging ระหว่าง CBZ และ ตัวกลางดูดซับทำให้ CBZ ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในกรณีนี้เกิดขึ้นในกรณีที่ไอออนมีวาเลนซ์เท่ากับ 2 เท่านั้น

ในกรณีที่การมีอยู่ของไอออนทำให้ประสิทธิภาพลดน้อยลงอาจเนื่องมาจากไอออนได้ปฏิสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับเดียวกันกับมลสาร CBZ ทำให้ CBZ ถูกดูดซับได้น้อยลง หรืออาจมาจากการใส่ไอออนลงไปในระบบดูดซับ และเกิด hydration radius (strain layer) ล้อมรอบไอออน ซึ่งอาจครอบคลุมพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวตัวกลางดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ทำอันตรกิริยา (active site) กับ CBZ ลดลง ส่งผลให้ CBZ ถูกดูดซับได้น้อยลง

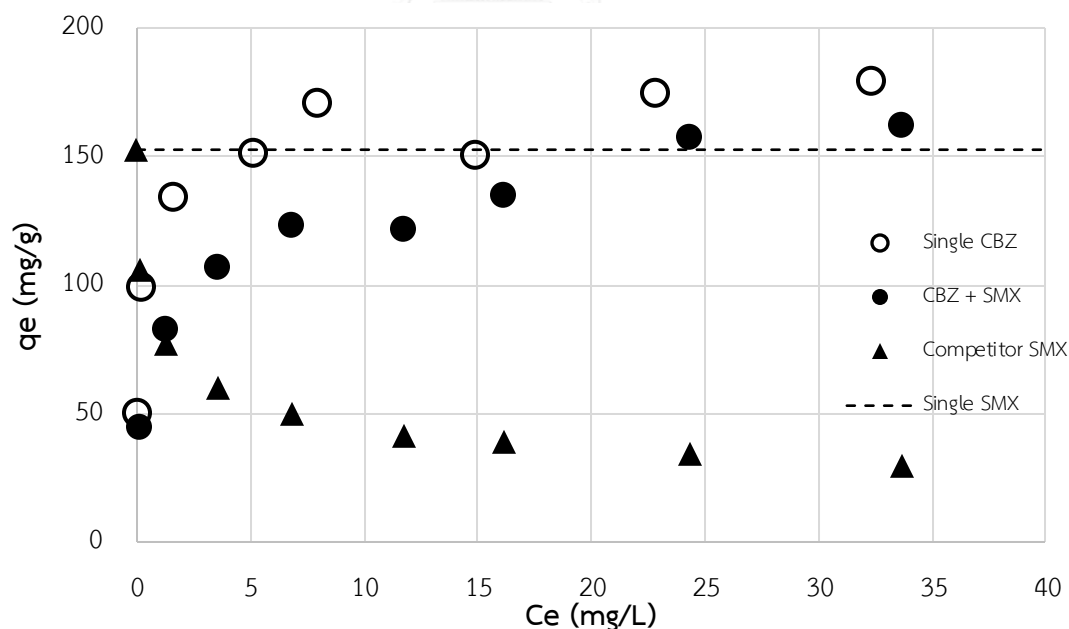
4.3.3 ผลการศึกษาการดูดซับคาร์บามาซีปีนร่วมกับยาซัลฟาเมทอกซาโซล

ทำการศึกษาการดูดซับคาร์บามาซีปีนร่วมกับซัลฟาเมทอกซาโซล โดยให้ทั้ง CBZ และ SMX เป็นตัวแข่งขัน (competitor) ซึ่งกันและกัน เมื่อ CBZ เป็นมลสารหลัก (dominant) จะใส่ SMX

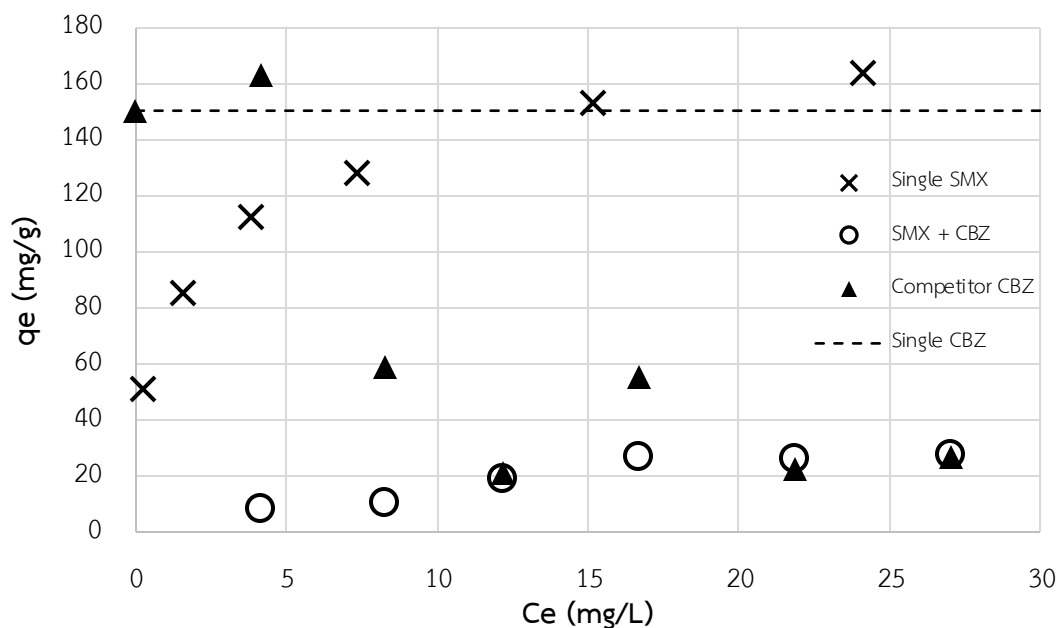
ในปริมาณคงที่ (competitor) ลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ CBZ ที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับมลสารทั้งสอง แล้วเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับของมลสารนั้นกับประสิทธิภาพการดูดซับเชิงเดี่ยวของตัวมันเอง

4.3.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX บน PAC

จากการศึกษา พบว่า ในระบบดูดซับผสมบนตัวกลางดูดซับ PAC มลสารหลักและมลสารที่เป็นตัวแข่งขัน มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในระบบการดูดซับเชิงเดี่ยว แต่ CBZ แสดงความเป็นตัวแข่งขันที่แข็งแกร่งกว่า SMX ทั้งนี้ เห็นได้จากประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน PAC ในระบบดูดซับเชิงผสมลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมี SMX เป็นตัวแข่งขัน ในทางกลับกัน เมื่อ CBZ เป็นตัวแข่งขัน ประสิทธิภาพการดูดซับ SMX บน PAC ลดลงเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ เมื่อสังเกตแนวโน้มการลดลงของตัวแข่งขันทั้งสอง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ SMX บนตัวกลางดูดซับ PAC ลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้น CBZ เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ CBZ เป็นตัวแข่งขัน ไม่สามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SMX และประสิทธิภาพการดูดซับที่ลดลงของ CBZ



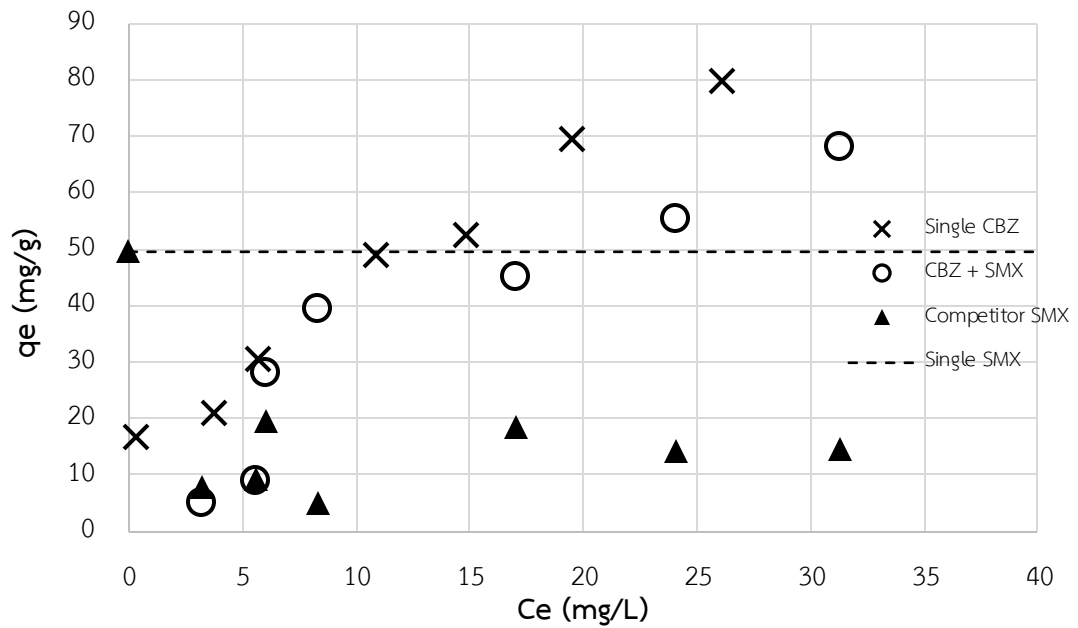
รูปที่ 4.33 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



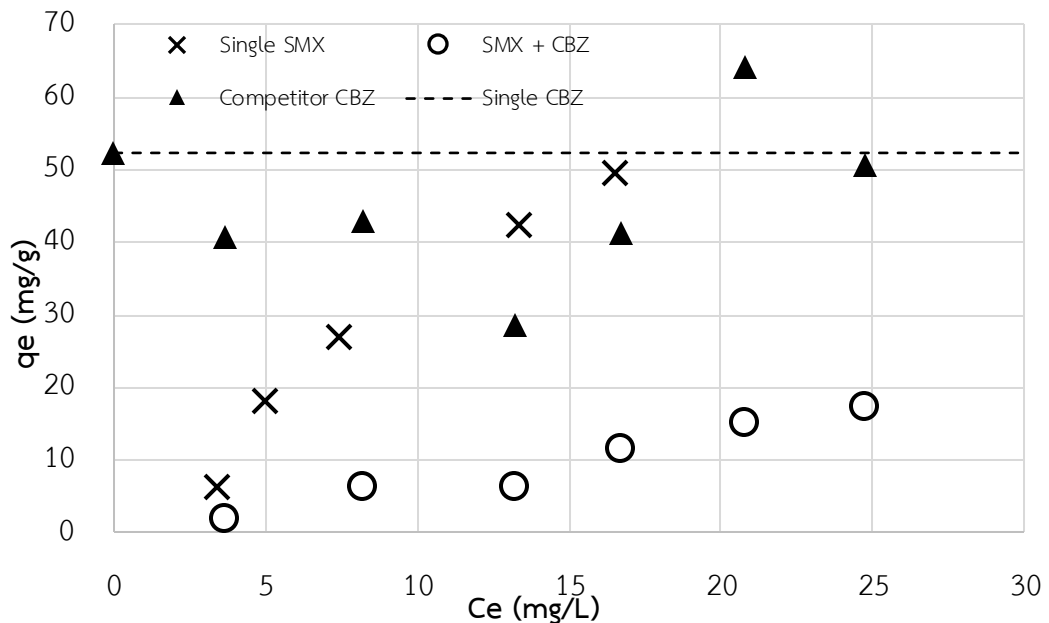
รูปที่ 4.34 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.3.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX บน GAC

จากการศึกษา พบว่า ในระบบดูดซับผสมบนตัวกลางดูดซับ GAC มลสารหลักและมลสารที่เป็นตัวแข่งขัน มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในระบบการดูดซับเชิงเดี่ยว ซึ่งมีผลเป็นไปในทางเดียวกันกับระบบดูดซับเชิงสารผสมบนตัวกลาง PAC นั่นคือ CBZ เป็นตัวแข่งขันที่แข็งแกร่งกว่า SMX ในระบบการดูดซับเชิงผสมบนตัวกลาง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับ SMX ของ GAC ภายใต้การมีอยู่ของ CBZ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในทุกช่วงความเข้มข้นของ SMX ในขณะที่ การมีอยู่ของตัวแข่งขัน SMX กลับไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ บน GAC ลดลงในช่วงค่าความเข้มข้นของ CBZ ต่ำ แต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพ CBZ ถูกดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้น CBZ สูงขึ้น



รูปที่ 4.35 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

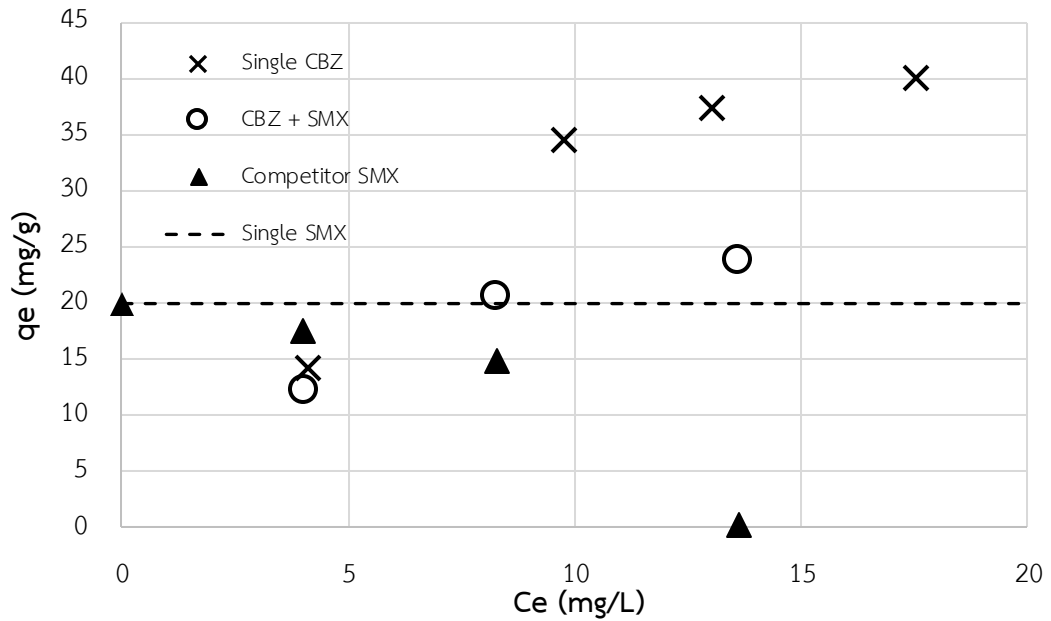


รูปที่ 4.36 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

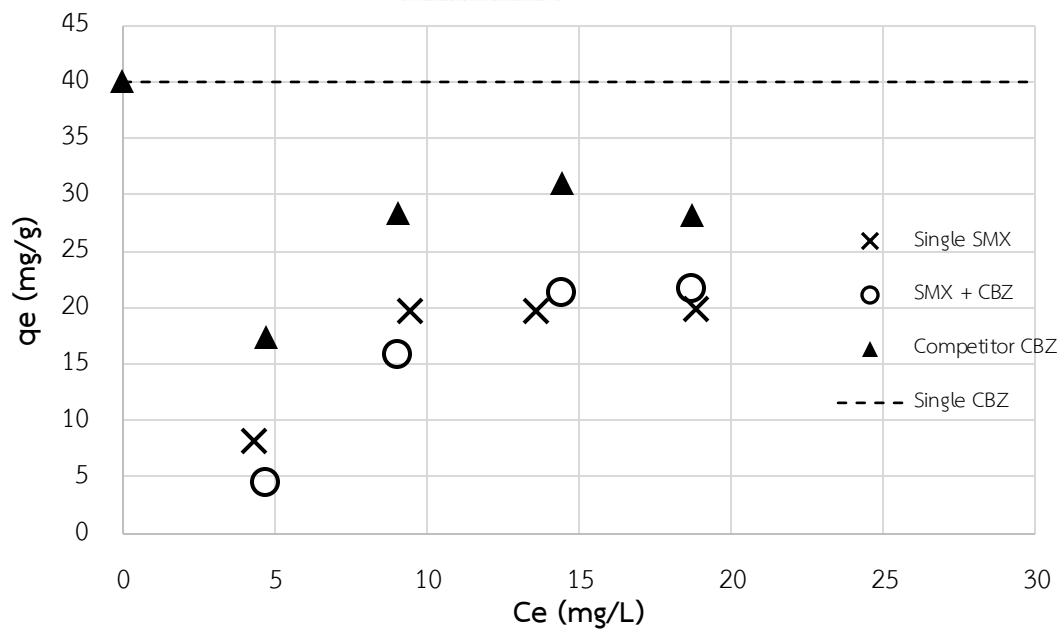
4.3.3.3 ผลการศึกษาการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX บน GO

เมื่อทำการศึกษาการดูดซับสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX พบว่า SMX เป็นตัวแข่งขันที่ส่งผลให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับ CBZ ในระบบสารเชิงผสมอย่างชัดเจน แต่ในขณะเดียวกัน SMX ซึ่งเป็นตัวแข่งขันกลับมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับในระบบการดูดซับเชิงเดี่ยวของ SMX (ดังรูป 4.37) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับเชิงผสมของ SMX ภายใต้การมีอยู่ของ CBZ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ CBZ ซึ่งเป็นตัวแข่งขันกลับมีประสิทธิภาพลดลง ดังแสดงในรูป 4.38

วิจารณ์ผลการทดลองการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX คาดว่าการที่มลสารทั้งสอง CBZ และ SMX มีประสิทธิภาพการถูกดูดซับลงบน PAC และ GAC น้อยลงไม่ว่าสารทั้งสองนั้นจะทำหน้าที่เป็น Dominant หรือ Competitor ในระบบดูดซับ เนื่องจากมลสารยาทั้งสองทำปฏิสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชัน (บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ) เดียวกัน ทำให้เกิดการดูดซับเชิงแข่งขันเพื่อแย่งชิงพื้นที่ (active site) ในการทำปฏิสัมพันธ์บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ทั้งนี้ เนื่องจาก CBZ มีความไม่ชอบน้ำสูงกว่า (hydrophobic) กอปรกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทั้งสองเป็นตัวกลางดูดซับชนิดไม่มีขั้ว (ความไม่ชอบน้ำสูง) เช่นกัน CBZ จึงแย่งชิงพื้นที่ (บนตัวกลางดูดซับ) ทำอันตรกริยาได้ดีกว่า SMX จึงทำให้เป็นตัวแข่งขันที่ดีกว่า SMX ในระบบการดูดซับเชิงผสมบนตัวกลางดูดซับ PAC และ GAC ซึ่งค่าเมื่อคำนวณค่า K_d ของมลสารในระบบดูดซับเชิงเดี่ยวและเชิงผสม แล้วนำค่ามาเปรียบเทียบกัน พบว่า ค่า K_d ในระบบการดูดซับเชิงผสมมีค่าน้อยกว่าในระบบดูดซับเชิงเดี่ยว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ตัวอย่างค่า K_d ณ ค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของมลสารในระบบ (C_e) เท่ากับ 0.01 เท่าของปริมาณมลสารที่สามารถละลายในน้ำได้ (C_s) ดังแสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.37 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GO (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.38 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GO (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.8 ค่าประสิทธิภาพการคัดแยกมลสารออกจากสารละลาย ที่ $C_e = 0.01C_s$ *

	ตัวกลางดูดซับ	ตัวแข่งขัน	K_d	ความแข็งแกร่งของตัวแข่งขัน $A = (K_d - K'_d) / K_d \times 100$
SMX	PAC	-	28.92	-
		CBZ	2.24	92.23
	GAC	-	4.01	-
		CBZ	0.88	78.06
GO	-	2.81	-	
	CBZ	1.86	15.11	
CBZ	PAC	-	105.12	-
		SMX	71.54	31.94
	GAC	-	10.99	-
		SMX	5.00	54.49
GO	-	7.32	-	
	SMX	5.30	38.18	

*การคำนวณอ้างอิงจากไอโซเทอร์มฟรุนดลิช, $K'_d =$ ค่า K_d ของมลสารจากระบบดูดซับเชิงผสม

$K_d =$ ค่า K_d ของมลสารจากระบบดูดซับเชิงผสม

C_s คือ ค่าการละลายของมลสาร (solubility)

สำหรับระบบการดูดซับเชิงสารผสม CBZ ร่วมกับ SMX ที่มี GO เป็นตัวกลางดูดซับ พบว่า SMX ไม่ได้รับผลกระทบจากการอยู่ร่วมกับ CBZ ในระบบมากนัก จะเห็นได้ว่าแม้ขณะที่ SMX ทำหน้าที่เป็นตัวแข่งขัน ประสิทธิภาพการดูดซับ SMX ของ GO ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับเชิงเดี่ยวของ SMX โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ SMX เป็นมลสารหลักในระบบ ประสิทธิภาพการดูดซับ SMX ของ GO ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า ในกรณีระบบดูดซับร่วมระหว่าง CBZ และ SMX ตัวกลางดูดซับ GO เลือกที่จะดูดซับ SMX มากกว่า CBZ หรืออีกในหนึ่ง คือ GO มีความสามารถในการดูดซับ SMX แบบคัดเลือก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า K_d พบว่า SMX เป็นตัวแข่งขันที่แข็งแกร่งกว่า CBZ ในระบบดูดซับที่มี GO เป็นตัวกลางดูดซับ

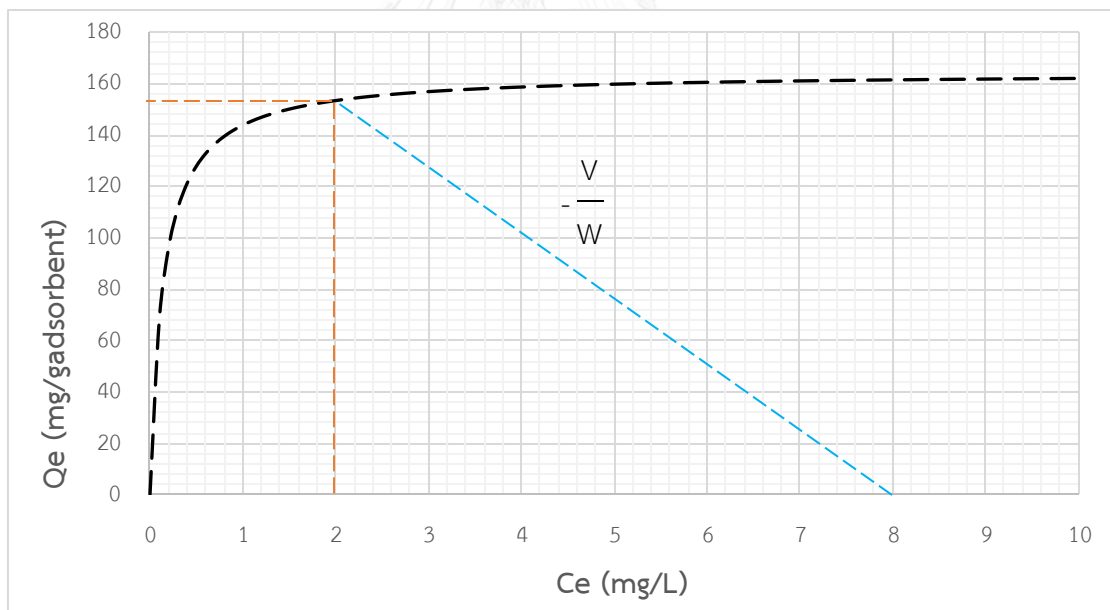
4.4 การนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้

4.4.1 ออกแบบระบบดูดซับแบบทีละเท

ตัวอย่างการออกแบบระบบดูดซับแบบทีละเทแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้ PAC เป็นตัวกลางดูดซับในการบำบัดคาร์บามาซีป็น เมื่อสมการดูดซับคาร์บามาซีป็นสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ค่า $b = 7.02$ ลิตรต่อมิลลิกรัมคาร์บามาซีป็น และ $q_m = 164.33$ มิลลิกรัมคาร์บามาซีป็นต่อกรัมตัวกลางดูดซับ (จากตารางที่ 4.5) สมการสมดุลดังแสดง

$$q_1 = \frac{7.02(164.33)C_1}{1+(7.02C_1)} \dots\dots\dots(4.1)$$

กรณีที่ 1 : ทราบความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) และความเข้มข้นสุดท้าย (C_1) ของคาร์บามาซีป็นที่ต้องการบำบัด ยกตัวอย่างเช่น $C_0 = 8$ mg/L ต้องการบำบัดให้เหลือ (C_1) 2 mg/L



รูปที่ 4.39 ตัวอย่างการออกแบบระบบดูดซับแบบทีละเทขั้นตอนเดียว เพื่อบำบัด CBZ ด้วย PAC

ลากเส้นตรงที่ความเข้มข้นสุดท้ายให้ตัดกับเส้นไอโซเทอร์ม อ่านค่าแกน Y จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดที่เท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้น (บนแกน X) ให้ตัดกับเส้นตรงเส้นแรกที่ลาก จะ

สามารถหาความเข้มข้นได้ ซึ่งความเข้มข้น เท่ากับ $-\frac{V}{W}$ โดย V = ปริมาตรของถังแบบที่ละเท และ W = ปริมาณตัวกลางดูดซับ PAC ที่ใช้ ซึ่งสามารถปรับขนาดของถังต่อปริมาณตัวกลางดูดซับที่ต้องการ

กรณีที่ 2 : คำนวณหาปริมาณ PAC ที่ต้องใช้ เมื่อทราบความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) และ ความเข้มข้นสุดท้าย (C_1) ของคาร์บอนมาซีป็นที่ต้องการบำบัด ยกตัวอย่างเช่น $C_0 = 8$ mg/L ต้องการบำบัดให้เหลือ (C_1) 2 mg/L ขนาดถังปฏิกรณ์ 100 ลิตร

$$\text{จะได้ว่า} \quad \frac{bq_m C_1}{1+bC_1} = \frac{V(C_0-C_1)}{W} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\frac{7.02(164.33)(2)}{1+(7.02 \times 2)} = \frac{100(8-2)}{W}$$

$$W = 0.26 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ปริมาณ PAC ที่ใช้} = 0.26 \times 100 = 26 \text{ กรัม}$$

กรณีที่ 3 : คำนวณความเข้มข้นขาออกจากถังปฏิกริยาแบบที่ละเท ยกตัวอย่างเช่น เติมน้ำมันก๊าดชนิดผง 1 กรัมต่อลิตร ลงในถังดูดซับขนาด 100 ลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{จากสมการ 4.2 จัดรูปได้} \quad W = \frac{V(C_0-C_1)(1+bC_1)}{W} \dots\dots\dots(4.3)$$

และสามารถคำนวณหาค่า C_1 โดยการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าเป็นจำนวนยกกำลังสอง ดังสมการที่ 4.4

$$C_1 = \frac{-B + \sqrt{(B^2 - 4D)}}{2} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\text{เมื่อ} \quad B = \frac{1}{b} + \frac{Wq_m}{V} - C_0 \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\text{และ} \quad D = \frac{-C_0}{b} \dots\dots\dots(4.6)$$

คำนวณค่า B จากสมการที่ 4.5

$$B = \frac{1}{7.02} + \frac{100(164.33)}{100} - 30$$

$$B = 134.47$$

คำนวณค่า D จากสมการที่ 4.6

$$D = \frac{-30}{7.02}$$

$$D = -4.27$$

คำนวณค่า C_1 จากสมการที่ 4.4

$$C_1 = \frac{-134.47 + \sqrt{(134.47)^2 - 4(-4.27)}}{2}$$

$$C_1 = -134.47 + 134.54$$

$$= 0.07 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

คำนวณหาปริมาณคาร์บอนมาซีปิ่นที่ถูกดูดซับจากสมการ 4.1

$$q_1 = \frac{7.02(164.33)(0.07)}{1 + (7.02 \times 0.07)}$$

$$= 54.14 \quad \text{มิลลิกรัมคาร์บอนมาซีปิ่นต่อกรัมคาร์บอน}$$

ปริมาณคาร์บอนมาซีปิ่นที่ถูกดูดซับทั้งหมด qW เท่ากับ

$$qW = 54.14 \frac{\text{mg CBZ}}{\text{g Carbon}} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{L}} \times 100 \text{ L}$$

$$= 5414 \quad \text{มิลลิกรัมคาร์บอนมาซีปิ่น}$$

4.4.2 ออกแบบระบบดูดซับแบบคอลัมน์

จากการประยุกต์ใช้กฎอัตรา Linear driving force (LDF) สำหรับการแพร่ CBZ จากชั้นฟิล์มเข้าสู่ตัวกลางดูดซับ PAC GAC และ GO สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากสมการการถ่ายเทมวลสาร

ตัวกลางดูดซับ	D_s (ม./วินาที)	k_f (ม./วินาที)	K_f (ม./วินาที)	k_s (ม./วินาที)	K_s (ม./วินาที)
PAC	1.41E-23	-8.69E-14	6.35E-10	7.41E-14	5.58E-11
GAC	5.51E-12	-4.14E-08	1.71E-05	2.30E-08	6.24E-06
GO	ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากไม่มีขนาดอนุภาค				

โดย D_s = ค่าคงที่การแพร่

k_f = สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นฟิล์ม

K_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในชั้นฟิล์มโดยรวม

k_s = สัมประสิทธิ์การแพร่จากชั้นฟิล์มเข้าสู่ของแข็ง

K_s = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารจากชั้นฟิล์มเข้าสู่ของแข็งโดยรวม

พบว่ากฎอัตรา LDF ไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายกลไกการแพร่ของ CBZ เข้าสู่ตัวกลางดูดซับ PAC และ GAC เนื่องจากค่าพารามิเตอร์บางตัว k_f มีค่าเป็นลบ จึงไม่สามารถคำนวณหาระยะเวลาการใช้งานของคอลัมน์ได้

ข้อควรระวัง

เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนาซีป็นในการทดลองมีความเข้มข้นที่สูงกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนาซีป็นที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้น จึงควรทดลองการดูดซับในระดับห้องปฏิบัติการด้วยความเข้มข้นของคาร์บอนาซีป็นที่ตรวจพบจริงตามธรรมชาติ

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ การทดลองดำเนินการในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดยใช้ตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน 3 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และแกราฟีนออกไซด์ และเลือกคาร์บอนมาซีป็นเป็นตัวแทนมลสารจากยาที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์การดูดซับคาร์บอนมาซีป็น และปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการดูดซับยาชนิดดังกล่าวด้วยตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน โดยทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเดี่ยว การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับ และศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ อีออนพื้นฐานต่างๆ ในน้ำ และสารตกค้างจากยาซัลฟาเมทอกซาโซลต่อการดูดซับสารคาร์บอนมาซีป็นบนตัวกลางชนิดคาร์บอน

5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

จากการศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน และค่าความแรงประจุบนพื้นที่ผิวตัวกลางดูดซับ (สรุปได้ดังตารางที่ 5.1) ทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของตัวกลางดูดซับที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารคาร์บอนมาซีป็น

ตารางที่ 5.1 สรุปสมบัติสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

ตัวกลางดูดซับ	ขนาดอนุภาค (mm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Å)	ปริมาตรรูพรุน (mL/g)	pH _{pzc}
PAC	1.90E-06	1149.43	13.92	0.7998	9.8
GAC	2.40	175.22	19.75	0.1731	6.2
GO	-	313.99	105.60	1.6580	3.1

5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบน GO เข้าสู่สมดุลเร็วที่สุด โดยเข้าสู่สมดุลภายใน 1 ชั่วโมง รองลงมา คือ PAC เข้าสู่สมดุลที่ 8 ชั่วโมง และการดูดซับบน GAC เข้าสู่สมดุลช้าสุดอยู่ที่ 20 ชั่วโมง ทั้งนี้ การดูดซับคาร์บอนมาซีปีนบนวัสดุทั้งสามเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก โดยผลการศึกษาพบว่าสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน มีความเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด

จากการศึกษาสามารถอธิบายอัตราเร็วในการดูดซับที่แตกต่างกันตามชนิดตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งพบว่า GO อัตราการดูดซับเริ่มต้นสูงที่สุด และมีชั้นการแพร่ภายในชั้นฟิล์มเป็นขั้นกำหนดอัตราของการดูดซับ ส่วน GAC มีอัตราการดูดซับเริ่มต้นน้อยที่สุด และมีชั้นการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นกำหนดอัตราตลอดการดูดซับจึงทำให้ การดูดซับ CBZ บน GAC เข้าสู่สมดุลช้าที่สุด สำหรับ PAC มีชั้นการแพร่ภายในชั้นฟิล์มเป็นขั้นกำหนดอัตราในช่วงแรกของการดูดซับ หลังจากนั้น มีชั้นการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วการดูดซับจนเข้าสู่สมดุล

5.1.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเดี่ยวของคาร์บอนมาซีปีน ซัลฟาเมทอกซาโซล และกรดแทนนิก

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของมลสารต่างๆ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับมลสารชนิดเดียวกันบนตัวกลางดูดซับต่างชนิดกัน ปัจจัยทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของมลสาร ยกเว้น ปัจจัยด้านพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดซับไม่สามารถนำอภิปรายประสิทธิภาพการดูดซับมลสารทั้งสามชนิดของ GO ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับที่น้อยกว่า GAC แม้ GO จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า GAC

จากการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนมาซีปีน ที่พีเอช 6.2 7 และ 8.2 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนมาซีปีนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสรุปได้ว่าในระบบการดูดซับเชิงเดี่ยว ช่วง พีเอช 6.2 – 8.2 บนตัวกลางดูดซับ PAC และ GAC แรงทางไฟฟ้า (electrostatic force) ไม่ใช่แรงหลักในการดูดซับ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยยังไม่สามารถอภิปรายถึงประสิทธิภาพการดูดซับบน GO ในช่วงพีเอชดังกล่าวได้

5.1.4 การศึกษาผลกระทบของ สาร อินทรีย์ธรรมชาติ อีออนพื้นฐานต่างๆ ในน้ำ และ สาร ตกค้างจากยาฆ่าพืชมอกษาโซลต่อการ ดูดซับคาร์บามาซีปีน

เมื่อมีสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ร่วมกับยา มีทั้งการดูดซับเชิงส่งเสริมและเชิงแข่งขัน พบว่า แทนที่ส่งเสริมให้ CBZ ถูกดูดซับบน GAC ได้มากขึ้น แต่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับยาของ PAC ลดลง

ประสิทธิภาพการดูดซับของ CBZ ภายใต้การมีอยู่ของอีออน K^+ NO_3^- CO_3^{2-} SO_4^{2-} Mg^{2+} Ca^{2+} บนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอนลดลง ยกเว้น การดูดซับบน GO ที่มีอีออน Mg^{2+} Ca^{2+} ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การมีหรือไม่มี Na^+ Cl^- อยู่ในระบบการ ดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ PAC และ GAC ไม่ทำให้ความสามารถในการถูกดูดซับของ CBZ ลดลง

การมีมลสารยา CBZ และ SMX อยู่ร่วมกัน ส่งผลให้เกิดการดูดซับเชิงแข่งขันบน ตัวกลางดูดซับ PAC และ GAC เนื่องจากยาทั้งสองน่าจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางดูดซับทั้งสอง บนหมู่ฟังก์ชันเดียวกัน แต่ไม่สามารถอภิปรายประสิทธิภาพการดูดซับของ SMX ในระบบดูดซับสาร ผสมบน GO ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการมี CBZ เป็นตัวแข่งขันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของคาร์บามาซีปีนบนตัวกลางดูดซับชนิดคาร์บอน ภายใต้การมีอยู่ของสารอินทรีย์ธรรมชาติและอีออนชนิดต่างๆ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในงานวิจัยนี้ ปริมาณอีออน หรือความเข้มข้นที่ทำการศึกษาไม่ใช่เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ ความเข้มข้น หรือปริมาณที่พบจริงในธรรมชาติ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมในสภาวะที่ใกล้เคียงสภาวะ แวดล้อมจริง

2. ควรศึกษาการดูดซับเชิงสารผสมระหว่าง อีออน สารอินทรีย์ธรรมชาติ และมลสารของยา

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เดชา. 2552. กระบวนการดูดซับ (Adsorption Processes). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปฎิภาณ. 2014. เอกสารประกอบคำสอนการดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียและผลิตน้ำประปา
(Adsorption for water and wastewater treatment).

ศูนย์พิษวิทยารามาธิบดี[ออนไลน์]. 2014.

http://med.mahidol.ac.th/poisoncenter/th/bulletin/bul98/v6n1/Cyp_450.

22/10/2014.

ภาษาอังกฤษ

Aguirre-Martinez, G. V., Owuor, M. A., Garrido-Perez, C., Salamanca, M. J., Del Valls, T. A., & Martin-Diaz, M. L. 2014. Are standard tests sensitive enough to evaluate effects of human pharmaceuticals in aquatic biota? Facing changes in research approaches when performing risk assessment of drugs. Chemosphere. 120C: 75-85.

Altmann, J., Ruhl, A. S., Zietzschmann, F., & Jekel, M. 2014. Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. Water Res. 55: 185-193.

Assani, A., Vafaei, F., Karaca, S., & Khataee, A. R. 2014. Adsorption of a cationic dye from aqueous solution using Turkish lignite: Kinetic, isotherm, thermodynamic studies and neural network modeling. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 20: 2615-2624.

Bahlmann, A., Brack, W., Schneider, R. J., & Krauss, M. 2014. Carbamazepine and its metabolites in wastewater: Analytical pitfalls and occurrence in Germany and Portugal. Water Res. 57: 104-114.

Bauer, J. E., Gerber, N., Lynn, R. K., Smith, R. G., & Thompson, R. M. 1976. A new N-glucuronide metabolite of carbamazepine. Cell. Mol. Life Sci. 32 (8): 1032-1033.

- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. 1940. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. Journal of the American Chemical society. 62: 1723-1732.
- Bui, T. X., & Choi, H. 2010. Influence of ionic strength, anions, cations, and natural organic matter on the adsorption of pharmaceuticals to silica. Chemosphere. 80: 681-686.
- Cabrera-Lafaurie, W. A., Roman, F. R., & Hernandez-Maldonado, A. J. 2014. Single and multi-component adsorption of salicylic acid, clofibric acid, carbamazepine and caffeine from water onto transition metal modified and partially calcined inorganic-organic pillared clay fixed beds. J Hazard Mater.
- Cai, N., & Larese-Casanova, P. 2014. Sorption of carbamazepine by commercial graphene oxides: a comparative study with granular activated carbon and multiwalled carbon nanotubes. J Colloid Interface Sci. 426: 152-161.
- Celiz, M. D., Perez, S., Barcelo, D., & Aga, D. S. 2009. Trace analysis of polar pharmaceuticals in wastewater by LC-MS-MS: comparison of membrane bioreactor and activated sludge systems. Chromatogr. Sci. 47 (1): 19-25.
- Chen, H., Gao, B., & Li, H. 2014. Functionalization, pH, and ionic strength influenced sorption of sulfamethoxazole on graphene. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2: 310-315.
- Clara, M., Kreuzinger, N., Strenn, B., Gans, O., & Kroiss, H. 2005. The solids retention time – a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. Water Res. 39: 97-106.
- Crank, J. (1956). *The Mathematics of Diffusion*, London: Oxford Univ. Press.
- Domínguez, J. R., González, T., Palo, P., & Cuerda-Correa, E. M. 2011. Removal of common pharmaceuticals present in surface waters by Amberlite XAD-7 acrylic-ester-resin: Influence of pH and presence of other drugs. Desalination. 269: 231-238.
- Eva, D., Salvador, O., & Aurelio, V. 2007. Adsorption of volatile organic compounds onto carbon nanotubes. Journal of Colloid and Interface Science. 305: 7-16.

- Falamarzian, S., Tavakoli, O., Zarghami, R., & Faramarzi, M. A. 2014. Catalytic hydrothermal treatment of pharmaceutical wastewater using sub- and supercritical water reactions. The Journal of Supercritical Fluids. 95: 265-272.
- Glueckauf, E. 1955. Theory of chromatography. Part 10.—Formulæ for diffusion into spheres and their application to chromatography. Transactions of the Faraday Society. 51: 1540-1551.
- Hai, F. I., Li, X., Price, W. E., & Nghiem, L. D. 2011. Removal of carbamazepine and sulfamethoxazole by MBR under anoxic and aerobic conditions. Bioresour Technol. 102: 10386-10390.
- Hyunook, K., Yu, S. H., & Virender, K. S. 2014. Adsorption of antibiotics and iopromide onto single-walled and multi-walled carbon nanotubes. Chemical Engineering Journal. 255: 23–27.
- Joss, A., Keller, E., Alder, A. C., Gbel, A., Mc Ardell, C. S., Ternes, T., & Siegrist, H. 2005. Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. Water Res. 31-39.
- Jurado, A., Lopez-Serna, R., Vazquez-Sune, E., Carrera, J., Pujades, E., Petrovic, M., & Barcelo, D. 2014. Occurrence of carbamazepine and five metabolites in an urban aquifer. Chemosphere. 115: 47-53.
- Kerr, J. G., & Eimers, M. C. 2012. Decreasing soil water Ca²⁺ reduces DOC adsorption in mineral soils: implications for long-term DOC trends in an upland forested catchment in southern Ontario, Canada. Sci Total Environ. 427-428: 298-307.
- Kim, Y., Bae, J., Park, J., Suh, J., Lee, S., Park, H., & Choi, H. 2014. Removal of 12 selected pharmaceuticals by granular mesoporous silica SBA-15 in aqueous phase. Chemical Engineering Journal. 256: 475-485.
- Kriemler, P., & Richter, W. J. 1978. In situ methylation and/or FD-MS: a comparative study of their usefulness in the structure analysis of highly polar metabolites. Recent Developments in Mass Spectrometry in Biochemistry and Medicine. 343-352.
- Leclercq, M., Mathieu, O., Gomez, E., Casellas, C., Fenet, H., & Hillaire-Buys, D. 2009. Presence and fate of carbamazepine, oxcarbazepine, and seven of their

- metabolites at wastewater treatment plants. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 56 (3): 408-415.
- Lerman, I., Chen, Y., Xing, B., & Chefetz, B. 2013. Adsorption of carbamazepine by carbon nanotubes: effects of DOM introduction and competition with phenanthrene and bisphenol A. Environ Pollut. 182: 169-176.
- Lowenberg, J., Zenker, A., Baggenstos, M., Koch, G., Kazner, C., & Wintgens, T. 2014. Comparison of two PAC/UF processes for the removal of micropollutants from wastewater treatment plant effluent: process performance and removal efficiency. Water Res. 56: 26-36.
- Luong, N. N., Faisa, I. H., Jinguo K., William, E. P., & Long, D. N. 2013. Coupling granular activated carbon adsorption with membrane bioreactor treatment for trace organic contaminant removal: Breakthrough behavior of persistent and hydrophilic compounds. Journal of Environmental Management. 119: 173-181.
- Maggs, J. L., Pirmohamed, M., Kitteringham, N. R., & Park, B. K. 1997. Characterization of the metabolites of carbamazepine in patient urine by liquid chromatography mass spectrometry. Drug Metab. Dispos. 25 (3): 275-280.
- Metcalf, C. D., Miao, X. S., Koenig, B. G., & Struger, J. 2003. Distribution of acidic and neutral drugs in จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย surface water near sewage treatment plants in the lower Great Lakes. Environ Toxicol Chem. 22: 2881-2889.
- Mohapatra, D. P., Brar, S. K., Daghrir, R., Tyagi, R. D., Picard, P., Surampalli, R. Y., & Drogui, P. 2014. Photocatalytic degradation of carbamazepine in wastewater by using a new class of whey-stabilized nanocrystalline TiO₂ and ZnO. Sci Total Environ. 485-486: 263-269.
- Moon, H. S., Lee, J. H., Kwon, S., Kim, I. T., & Lee, S. G. 2015. Mechanisms of Na adsorption on graphene and graphene oxide: density functional theory approach. energy. 16: 19.
- Nguyen, L. N., Hai, F. I., Kang, J., Price, W. E., & Nghiem, L. D. 2012. Removal of trace organic contaminants by a membrane bioreactor-granular activated carbon (MBR-GAC) system. Bioresour Technol. 113: 169-173.

- Prajapati, S. T., Gohel, M. C., & Patel, L. D. 2007. Studies to enhance dissolution properties of carbamazepine. Int J Pharm Sci. 69: 427-430.
- Prarat, P., Ngamcharussrivichai, C., Khaodhiar, S., & Punyapalakul, P. 2011. Adsorption characteristics of haloacetonitriles on functionalized silica-based porous materials in aqueous solution. J Hazard Mater. 192: 1210-1218.
- Punyapalakul, P., & Takizawa, S. 2004. Effect of organic grafting modification of hexagonal mesoporous silicate on haloacetic acid removal. Environmental Engineering Research. 41: 247-256.
- Rao, Y. F., Qu, L., Yang, H., & Chu, W. 2014. Degradation of carbamazepine by Fe(II)-activated persulfate process. J Hazard Mater. 268: 23-32.
- Richter, W. J., Kriemler, P., & Faigle, J. W. 1978. Newer aspects of the biotransformation of carbamazepine: structural characterization of highly polar metabolites. Recent Developments in Mass Spectrometry in Biochemistry and Medicine. 1-14.
- Sherif, M. T., Mohamed, E. A., Ashraf, E. E., & Mohamed, Y. E. 2014. Adsorption of 15 different pesticides on untreated and phosphoric acid treated biochar and charcoal from water. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2: 2013-2025.
- Sing, K. 1982. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Provisional). Pure and applied chemistry. 54: 2201-2218.
- STEVENSON, F. J., & GOH, K. M. 1971. Infrared spectroscopy of humic acids and related substances. Geochimica et Cosmochimica Acta. 35: 471-483.
- Suriyanon, N., Punyapalakul, P., & Ngamcharussrivichai, C. 2013. Mechanistic study of diclofenac and carbamazepine adsorption on functionalized silica-based porous materials. Chemical Engineering Journal. 214: 208-218.
- USEPA[online]. 2014. http://www.epa.gov/rpdweb00/docs/kdreport/vol2/402-r-99-004b_ch2.pdf [online]. [2014,30]
- Vergili, I. 2013. Application of nanofiltration for the removal of carbamazepine, diclofenac and ibuprofen from drinking water sources. J Environ Manage. 127: 177-187.

- Vernouillet, G., Eullaffroy, P., Lajeunesse, A., Blaise, C., Gagne, F., & Juneau, P. 2010. Toxic effects and bioaccumulation of carbamazepine evaluated by biomarkers measured in organisms of different trophic levels. Chemosphere. 80: 1062-1068.
- Wang, C., Li, H., Liao, S., Zhang, D., Wu, M., Pan, B., & Xing, B. 2014. Sorption affinities of sulfamethoxazole and carbamazepine to two sorbents under co-sorption systems. Environ Pollut. 194: 203-209.
- Wang, C., Li, H., Liao, S., Zheng, H., Wang, Z., Pan, B., & Xing, B. 2013. Coadsorption, desorption hysteresis and sorption thermodynamics of sulfamethoxazole and carbamazepine on graphene oxide and graphite. Carbon. 65: 243-251.
- Weber, W. J., & Morris, J. C. 1963. Kinetics of adsorption on carbon from solution. Journal of the Sanitary Engineering Division. 89: 31-60.
- Xu, Y., Bai, H., Lu, G., Li, C., & Shi, G. 2008. Flexible graphene films via the filtration of water-soluble noncovalent functionalized graphene sheets. Journal of the American Chemical Society. 130: 5856-5857.
- Zhang, Y., Geißen, S. U., & Gal, C. 2008. Carbamazepine and diclofenac: removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. Chemosphere. 73: 1151-1161.
- Zhao, X., & Metcalfe, C. D. 2008. Characterizing and compensating for matrix effects using atmospheric pressure chemical ionization liquid chromatography-tandem mass spectrometry: analysis of neutral pharmaceuticals in municipal wastewater. Anal. Chem. 80 (6): 2010-2017.

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การเตรียมฟอสเฟตบัพเฟอร์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

1. อุปกรณ์และสารเคมี

- 1.1) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต
- 1.2) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
- 1.3) น้ำ ultrapure DI 18.2 MΩ
- 1.4) เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer)
- 1.5) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 1.6) ปีกเกอร์
- 1.7) ขวดวัดปริมาตร

2. ตัวอย่างการเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

- 2.1) ต้องการเตรียม 0.1 M phosphate buffer pH 7 ค่าความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \frac{[\text{Na}_2\text{HPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]}$$

$$7 = 6.86 + \log \frac{[\text{Na}_2\text{HPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]}$$

$$[\text{Na}_2\text{HPO}_4] = 1.38 [\text{NaH}_2\text{PO}_4] \dots\dots\dots (\text{ก.1})$$

ให้ $[\text{Na}_2\text{HPO}_4] = a$ โมลต่อลิตร และ $[\text{NaH}_2\text{PO}_4] = b$ โมลต่อลิตร

คำนวณปริมาณค่าความแรงประจุจากสมการ

$$\mu = \frac{1}{2} [\sum c_i Z_i^2] \dots\dots\dots (\text{ก.2})$$

โดย

C คือ ความเข้มข้นของไอออน มีหน่วยเป็นโมลต่อลิตร

Z คือ ค่าประจุของไอออน

$$\mu = \frac{1}{2} \{ ([\text{Na}] \times (+1)^2) + ([\text{HPO}_4^{2-}] \times (-2)^2) + ([\text{H}_2\text{PO}_4^-] \times (-1)^2) \}$$

$$\mu = \frac{1}{2} \{ (2a \times (+1)^2) + (b \times (+1)^2) + (a \times (-2)^2) + (b \times (-1)^2) \}$$

$$\mu = 3a + b \dots \dots \dots (ก.3)$$

จากสมการ ก.1 และ ก.2 จะได้ว่า

$$0.1 = 3(1.38b) + b$$

$$a = 0.0268 \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$b = 0.0194 \text{ โมลต่อลิตร}$$

หาปริมาณ $[\text{Na}_2\text{HPO}_4]$ และ $[\text{NaH}_2\text{PO}_4]$ ที่ใช้ด้วย

$$\text{ปริมาณ } \text{Na}_2\text{HPO}_4 = 0.0268 \times \text{MW. Na}_2\text{HPO}_4$$

$$\text{ปริมาณ } \text{NaH}_2\text{PO}_4 = 0.0194 \times \text{MW. NaH}_2\text{PO}_4$$

- 2.2) ชั่ง Na_2HPO_4 และ NaH_2PO_4 ที่คำนวณได้จากข้อ 2.1) ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นพอประมาณ กวนด้วยเครื่องกวนสารจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2.3) เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในขวดสีชา

ภาคผนวก ข
การสร้างกราฟมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของมลสารยาในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

1. อุปกรณ์และสารเคมี

- 1.1) เครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 1.2) คาร์บามาซีป็น (CBZ), HPLC grade บริษัท Sigma Aldrich
- 1.3) ซัลฟาเมทอซาโซล (SMX) HPLC grade บริษัท Sigma Aldrich
- 1.4) เมทานอล
- 1.5) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
- 1.6) น้ำ ultrapure DI 18.2 MΩ
- 1.7) คิวเวต (cuvette)
- 1.8) ขวดวัดปริมาตร
- 1.9) ปิเปต
- 1.10) Syringe filter

2. การเตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของมลสารยา

- 2.1) ชั่งน้ำหนักคาร์บามาซีป็น 0.2 กรัม
- 2.2) ละลายด้วยเมทานอล 50 มิลลิลิตร
- 2.3) เก็บสารละลายเข้มข้นในขวดเก็บสารเคมีสีชา
- 2.4) เตรียมสารละลายเข้มข้นซัลฟาเมทอซาโซลตามข้อ 2.1) – 2.3)

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานจากสารละลายเข้มข้น

- 3.1) ปิเปตสารละลายคาร์บามาซีป็นจากสารละลายเข้มข้นตามปริมาตรในตารางที่ ข.1 ซึ่ง
คำนวณจาก $C_1 V_1 = C_2 V_2$ (ข.1)

โดยที่ C_1 คือความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

C_2 คือความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

V_1 คือปริมาตรของสารตั้งต้นที่ใช้

และ V_2 คือปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

- 3.2) ตวงฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.3) เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

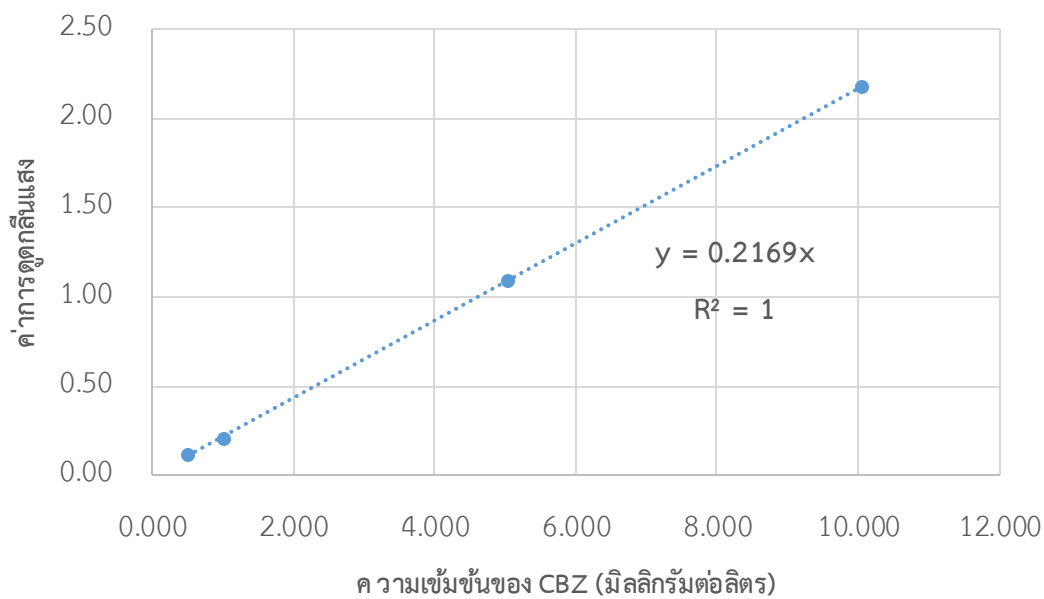
3.4) เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลฟาเมทอซาโซลตามข้อ 3.1) – 3.3)

ตารางที่ ข.1 ปริมาตรของสารละลายเข้มข้นมลสารยาที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

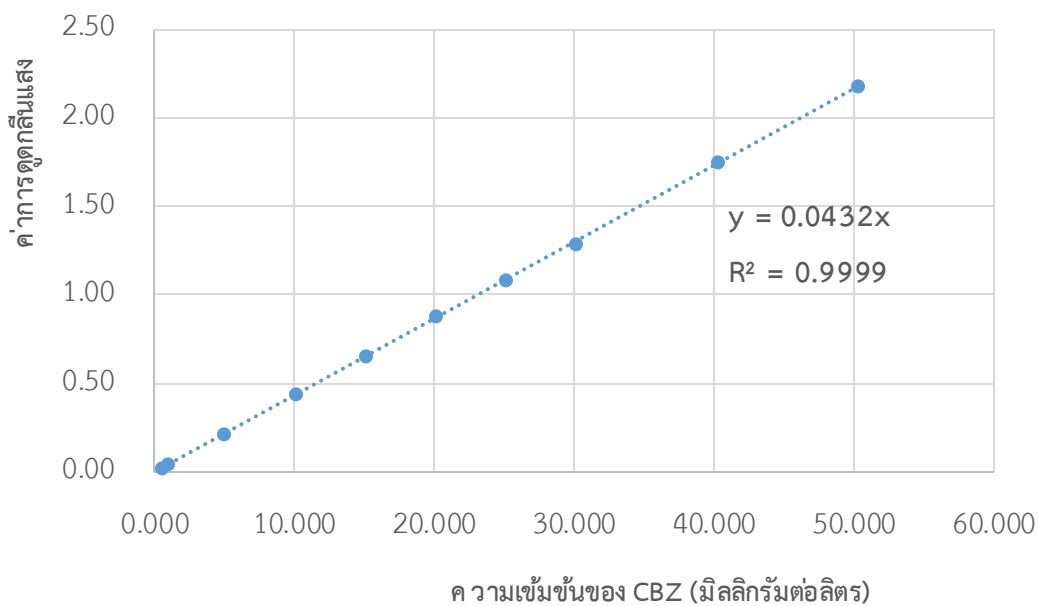
ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาตรของสารละลายเข้มข้นที่ใช้ (มิลลิลิตร)
0	0
0.5	0.0125
1	0.025
5	0.125
10	0.250
20	0.500
30	1.000
50	1.125

4. การสร้างกราฟมาตรฐานมลสารยา

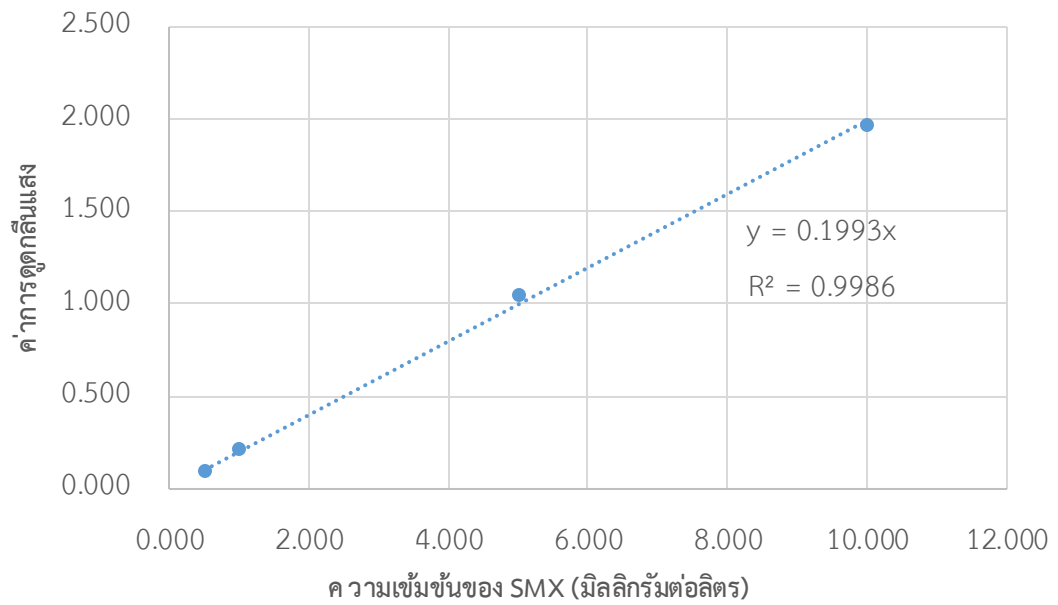
- 4.1) นำสารละลายมาตรฐานคาร์บามาซีปีนกรองด้วย syringe filter ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 284 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank
- 4.2) สร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน
- 4.3) สร้างกราฟมาตรฐานของซัลฟาเมทอซาโซลตามข้อ 4.1) – 4.2) แต่วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร



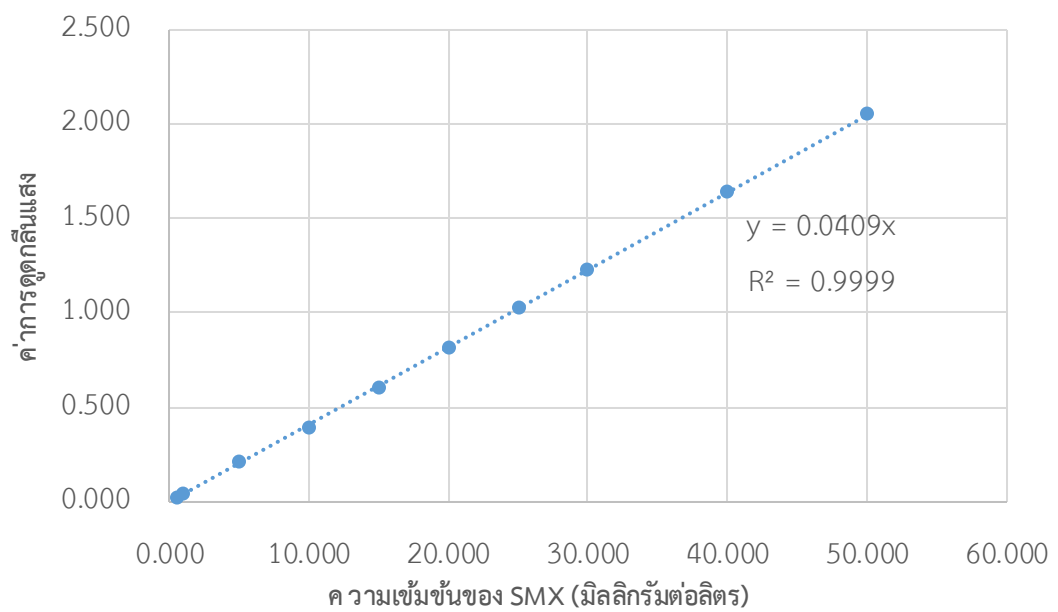
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐาน CBZ ของ Cuvette ที่ความหนาเซลล์ 5 เซนติเมตร



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐาน CBZ ของ Cuvette ที่ความหนาเซลล์ 1 เซนติเมตร



รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐาน SMX ของ Cuvette ที่ความหนาเซลล์ 5 เซนติเมตร



รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐาน SMX ของ Cuvette ที่ความหนาเซลล์ 1 เซนติเมตร

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดแทนนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

1. อุปกรณ์และสารเคมี

- 1.1) เครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 1.2) เครื่องวัด TOC
- 1.3) กรดแทนนิก (tannic acid) HPLC grade บริษัท Sigma Aldrich
- 1.4) น้ำ ultrapure DI 18.2 MΩ
- 1.5) ฟอสเฟสบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
- 1.6) กรวยกรองบุชเซอร์ ขนาด 47 มิลลิเมตร
- 1.7) กระจาดกรอง Nylon ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน ขนาด 47 มิลลิเมตร
- 1.8) คิวเวต (cuvette)
- 1.9) ขวดวัดปริมาตร
- 1.10) ปิเปต
- 1.11) Syringe filter

2. การเตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของกรดแทนนิก

- 2.1) ชั่งน้ำหนักกรดแทนนิก 0.5 กรัม
- 2.2) ละลายด้วยน้ำ 500 มิลลิลิตร
- 2.3) กรองด้วยกระจาดกรอง Nylon ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน
- 2.4) เก็บสารละลายเข้มข้นในขวดเก็บสารเคมีสีชา

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานจากสารละลายเข้มข้น

- 3.1) วัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ด้วยเครื่องวัด TOC แปลงค่า TOC ที่วัดได้เป็นความเข้มข้นของกรดแทนนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดย

$$\text{ความเข้มข้นของกรดแทนนิก} = \frac{\text{ค่า TOC ที่วัดได้ (mg/L)}}{912.76} \times 1701.20 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

- 3.2) ปิเปตสารละลายกรดแทนนิกจากสารละลายเข้มข้นซึ่งคำนวณจาก $C_1V_1 = C_2V_2$ ให้ได้ความเข้มข้น 5 10 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

โดยที่ C_1 คือความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

C_2 คือความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

V_1 คือปริมาตรของสารตั้งต้นที่ใช้

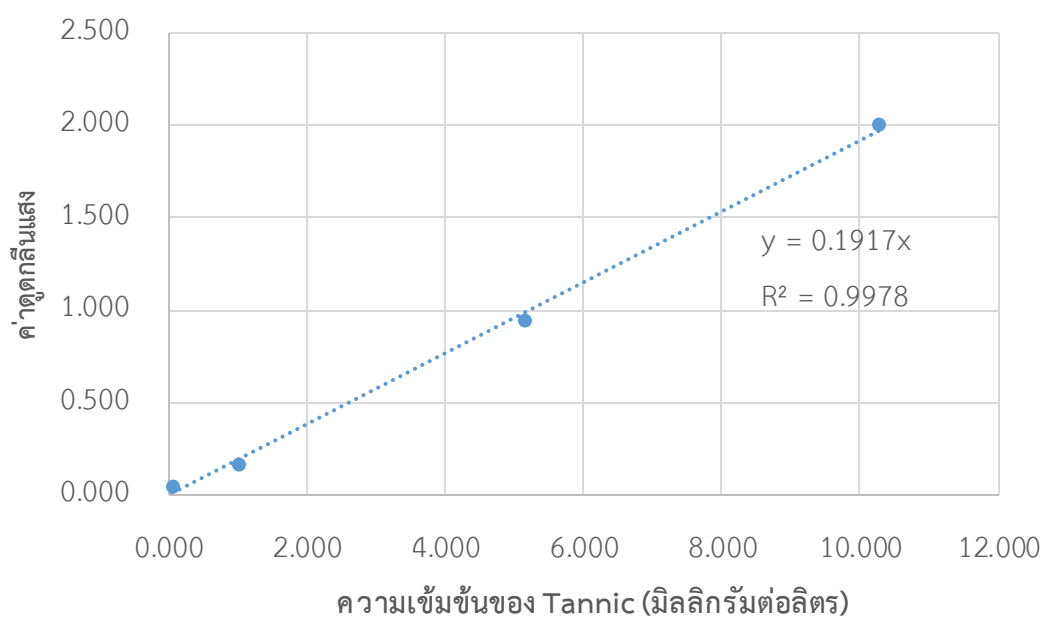
และ V_2 คือปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

3.3) เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

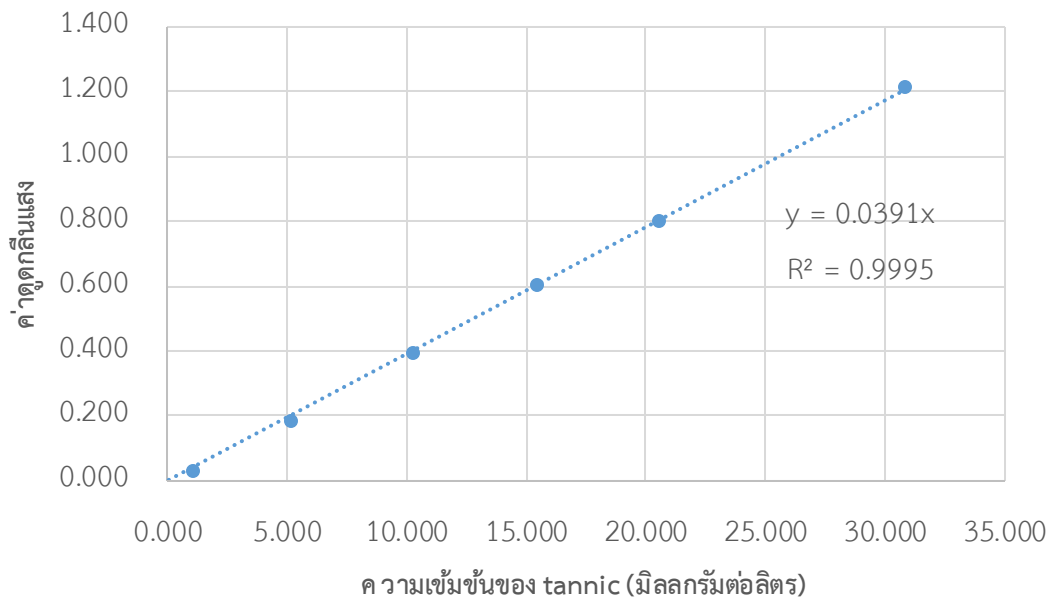
4. การสร้างกราฟมาตรฐานของกรดแทนนิก

4.1) นำสารละลายมาตรฐานกรดแทนนิกที่ผ่านการกรองด้วย syringe filter ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank

4.2) สร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐาน Tannic ของ Cuvette ที่ความหนาเซลล์ 5 เซนติเมตร



รูปที่ ข.6 กราฟมาตรฐาน Tannic ของ Cuvette ที่ความหนาเซลล์ 1 เซนติเมตร



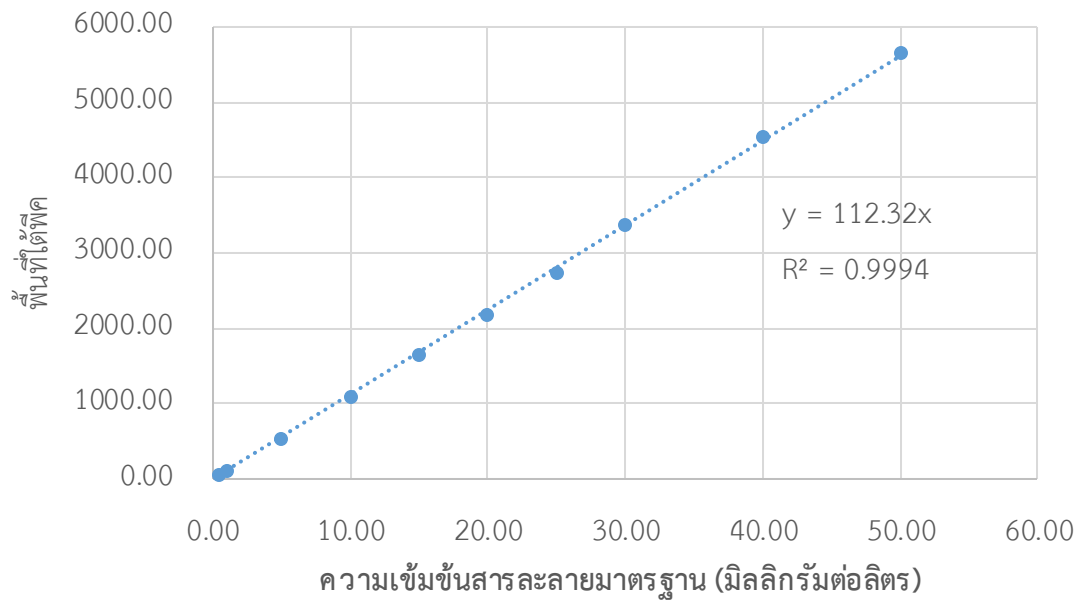
การวิเคราะห์ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์ประสิทธิภาพสูง

1. อุปกรณ์และสารเคมี

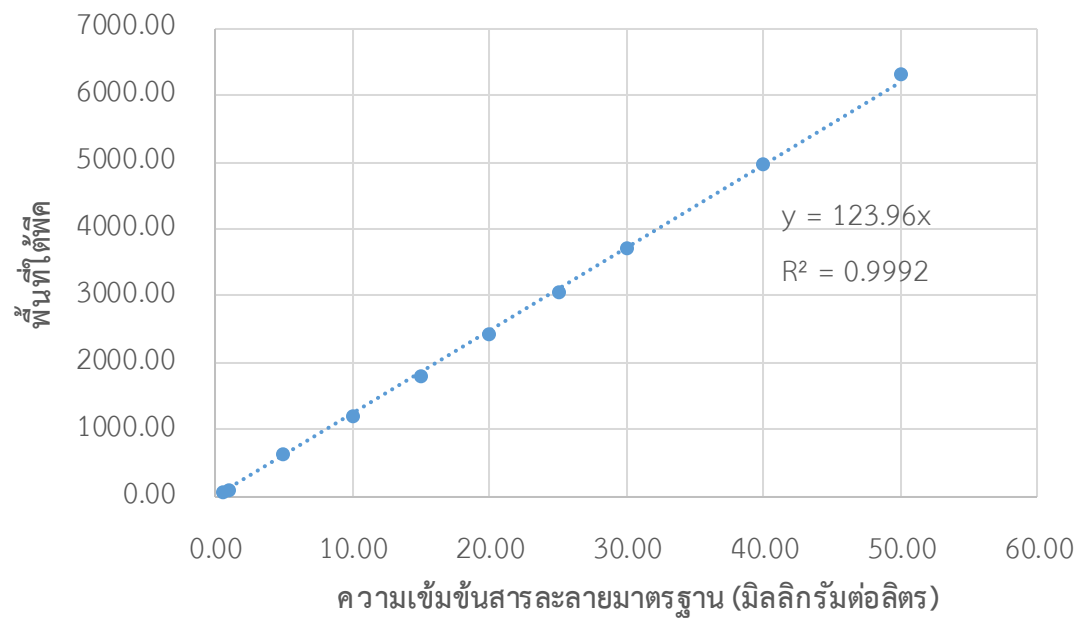
- 1.1) เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC-DAD)
- 1.2) เครื่อง sonicator
- 1.3) คอลัมน์ C18
- 1.4) สารละลายมาตรฐานคาร์บามาซีป็น ซัลฟาเมโทซาโซล และกรดแทนนิก
- 1.5) เมทานอล HPLC grade บริษัท Merck
- 1.6) อะซิโตรไนไตรล์ HPLC grade บริษัท Merck
- 1.7) น้ำ ultrapure DI 18.2 M Ω
- 1.8) ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
- 1.9) กระจาดกรอง Nylon ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน ขนาด 47 มิลลิเมตร
- 1.10) Syringe filter
- 1.11) Vial สีชา ขนาด 2 มิลลิลิตร

2. การสร้างกราฟมาตรฐาน

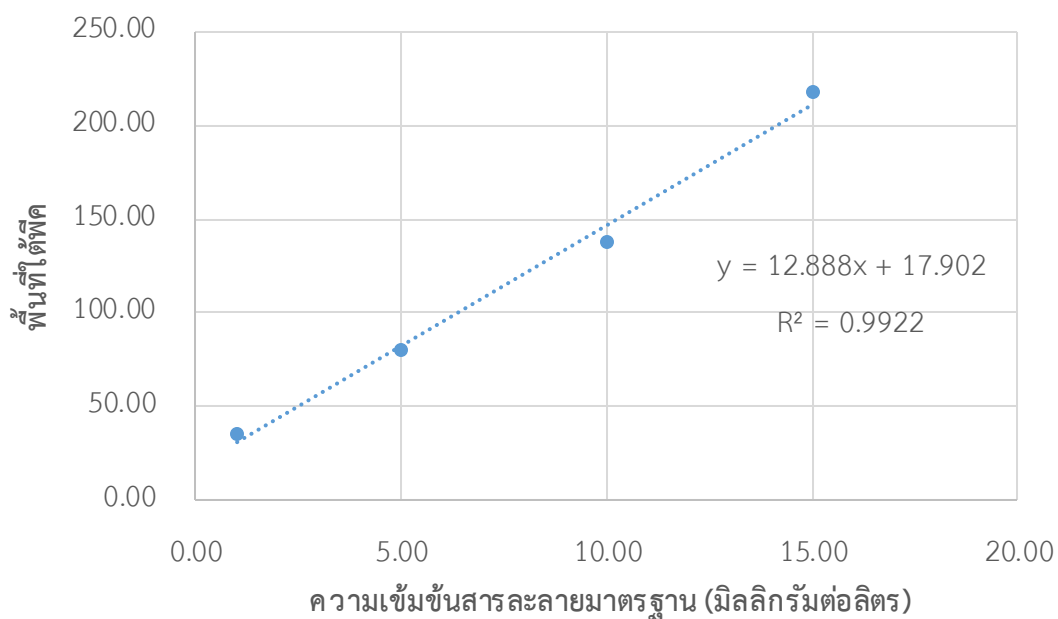
- 2.1) กรองเฟสเคลื่อนที่ด้วยกระจาดกรอง Nylon ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน
- 2.2) ทำการไล่ก๊าซ (degas) ออกจากเฟสเคลื่อนที่
- 2.3) ทำการเตรียมคอลัมน์ (column conditioning) ด้วยเฟสเคลื่อนที่ในอัตราส่วนที่ต้องการ ระยะเวลาประมาณ 2 เท่าของความยาวคอลัมน์ (\approx 58 นาที)
- 2.4) เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นอย่างน้อย 5 ความเข้มข้น (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นที่ทำการทดลอง) แล้วกรองสารละลายมาตรฐานด้วย syringe filter
- 2.5) ฉีดสารละลายมาตรฐาน แล้วนำพื้นที่ใต้พีคมาสร้างกราฟมาตรฐาน โดยพลอตระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้พีค



รูปที่ ข.7 กราฟมาตรฐาน CBZ วัดที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร



รูปที่ ข.8 กราฟมาตรฐาน SMX วัดที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร



รูปที่ ข.9 กราฟมาตรฐาน Tannic วัดที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

ภาคผนวก ค
การศึกษากระบวนการดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ CBZ โดยใช้ PAC GAC และ GO
ในสภาวะพีเอช 7 ค่า ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	C_t (mg/L)	Q_t (mg/g)	เวลา (นาที)	C_t (mg/L)	Q_t (mg/g)	เวลา (นาที)	C_t (mg/L)	Q_t (mg/g)
0	33.03089	0	0	28.76841	0	0	28.01075	0
1	27.33591	56.8078	1	27.74704	26.87799	1	27.61649	3.93282
5	24.6332	83.7674	2	27.60235	30.6857	5	27.13262	8.759463
10	22.52896	104.757	5	26.63205	56.21979	10	26.43369	15.73128
15	21.10039	119.008	10	25.70432	80.63396	20	25.57348	24.31198
20	19.94208	130.562	15	25.44897	87.35346	30	24.85663	31.46256
30	18.37838	146.16	20	25.2447	92.72906	60	23.8172	41.83091
60	15.71429	172.734	30	25.0532	97.76868	140	21.98925	60.06489
120	13.8417	191.413	60	25.08299	96.98474	273	20.48387	75.08111
240	12.99228	199.886	120	25.06596	97.4327	522	19.08602	89.02475
360	12.62548	203.545				720	17.31183	106.7224
480	12.52896	204.508				1200	15.77061	122.0962
600	12.37452	206.049				1540	15.69892	122.8113
720	12.33591	206.434						
960	12.35521	206.241						
1200	12.23938	207.397						
1440	12.20077	207.782						

ตารางที่ ค.2 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ ด้วย PAC ที่พีเอช 6.2 7 และ 8 ionic strength 0.01 โมลาร์
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

pH 6.2				pH 7				pH 8.2			
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	PAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	PAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	PAC weight (g)
5.0693	0.0315	50.3779	0.0040	5.0513	0.0355	50.1579	0.0040	5.1881	0.0312	50.3110	0.0041
10.2178	0.2758	101.9694	0.0039	10.1578	0.2564	99.0138	0.0040	10.2970	0.2030	98.4779	0.0041
15.5644	2.3483	135.5492	0.0039	15.1085	1.6568	134.5168	0.0040	15.2079	1.4955	133.7796	0.0041
20.2772	5.1300	155.3559	0.0039	20.2959	5.1479	151.4793	0.0040	20.2970	4.8067	151.1250	0.0041
25.1287	9.5232	160.0561	0.0039	25.0493	7.9440	171.0535	0.0040	24.9505	7.2784	172.4106	0.0041
30.0990	12.8317	177.1008	0.0039	29.9211	14.8915	150.2959	0.0040	30.1188	13.4257	162.8592	0.0041
39.9604	22.3168	180.9596	0.0039	40.3550	22.8402	175.1479	0.0040	40.1980	20.8515	188.7467	0.0041
50.2574	30.5743	201.8786	0.0039	50.2564	32.3274	179.2899	0.0040	50.1782	29.9604	197.2470	0.0041

ตารางที่ ค.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ ด้วย GAC ที่พีเอช 6.2 7 และ 8 ionic strength 0.01 โมลาร์
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

pH 6.2					pH 7					pH 8.2				
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)		C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)		C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)	
5.1848	0.9011	14.8999	0.0115		5.1896	0.2885	16.6141	0.0118		5.1772	0.5192	16.2018	0.0115	
10.1632	2.3297	27.2472	0.0115		9.9134	3.7675	20.8336	0.0118		9.7362	1.0385	30.2530	0.0115	
14.8536	6.6154	28.6546	0.0115		14.6731	5.6554	30.5684	0.0118		14.6538	4.9615	33.7124	0.0115	
19.5165	7.5824	41.5098	0.0115		19.9038	3.1369	56.8373	0.0118		19.8654	6.2885	47.2241	0.0115	
24.7912	13.0769	40.7453	0.0115		25.3269	10.8462	49.0874	0.0118		25.2885	10.2500	52.3077	0.0115	
29.7582	16.9451	44.5676	0.0115		30.2692	14.8269	52.3468	0.0118		30.3462	14.7038	54.4080	0.0115	
39.2088	23.1429	55.8815	0.0115		40.0000	19.5385	69.3611	0.0118		40.1538	24.9615	52.8428	0.0115	
49.0989	33.2747	55.0406	0.0115		49.6538	26.0962	79.8566	0.0118		49.9423	33.5769	56.9231	0.0115	

ตารางที่ ค.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ ด้วย GO ที่พีเอช 6.2 7 และ 8 ionic strength 0.01 โมลาร์
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

pH 6.2				pH 7				pH 8.2			
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)
4.7743	4.4487	6.6731	0.0020	4.7931	4.1006	14.1973	0.0020	4.7365	3.8491	18.1915	0.0020
9.8316	9.0522	15.9768	0.0020	11.4733	9.7872	34.5648	0.0020	9.6995	8.5687	23.1818	0.0020
14.7757	13.4429	27.3211	0.0020	14.8700	13.0458	37.3958	0.0020	14.7757	13.5203	25.7350	0.0020
19.9840	17.5629	49.6325	0.0020	19.4745	17.5242	39.9807	0.0020	19.8330	18.3366	30.6770	0.0020

ตารางที่ ค.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ SMX ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

PAC				GAC				GO			
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	PAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)
5.2383	0.2445	51.2188	0.0039	5.1676	3.3644	6.4401	0.0112	4.7104	4.3125	8.1562	0.0020
9.8746	1.5648	85.2284	0.0039	10.0722	4.9472	18.3033	0.0112	10.4268	9.4688	19.6406	0.0020
14.7922	3.8386	112.3441	0.0039	15.0216	7.4457	27.0570	0.0112	14.5732	13.6094	19.7578	0.0020
19.8533	7.3350	128.3932	0.0039	20.2453	13.6797	23.4488	0.0112	19.8018	18.8281	19.9609	0.0020
24.9878	13.1296	121.6225	0.0039	25.2237	13.3766	42.3109	0.0112				
30.0489	15.1589	152.7177	0.0039	30.3896	16.5224	49.5259	0.0112				
40.0489	24.0831	163.7515	0.0039	39.4949	25.7720	49.0105	0.0112				
50.1467	35.1834	153.4700	0.0039								

ตารางที่ ค.6 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ Tannic ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

PAC				GAC			
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	PAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)
4.9565	0.5013	44.5527	0.0040	3.3807	1.8788	5.4122	0.0111
10.4092	3.1328	70.9890	0.0041	6.9212	4.3063	9.4229	0.0111
15.5388	7.7444	77.9449	0.0040	10.8434	7.6593	11.2711	0.0113



ตารางที่ ค.7 การศึกษาผลกระทบของ IS ต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ PAC พีเอช 7 background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เติม NaCl 10 mM				เติม NaCl 20 mM				เติม NaCl 50 mM			
C_i	C_e	Q_e	PAC	C_i	C_e	Q_e	PAC	C_i	C_e	Q_e	PAC
(mg/L)	(mg/L)	(mg/g)	weight (g)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/g)	weight (g)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/g)	weight (g)
5.0000	0.0466	50.8041	0.0039	4.9941	0.0354	49.5871	0.0040	4.9941	0.0354	48.3777	0.0041
10.2745	0.3137	102.1619	0.0039	10.0865	0.2949	97.9158	0.0040	10.0865	0.2949	95.5277	0.0041
15.4118	1.7647	139.9698	0.0039	15.4510	2.3909	130.6010	0.0040	15.4510	2.3909	127.4156	0.0041
20.8039	5.9961	151.8749	0.0039	20.1765	5.7255	144.5095	0.0040	20.1765	5.7255	140.9849	0.0041
25.5490	9.4019	165.6111	0.0039	25.1569	8.6748	164.8207	0.0040	25.1569	8.6748	160.8007	0.0041
29.8438	12.0117	173.9710	0.0041	30.0969	13.3140	167.8295	0.0040	30.4510	12.1765	178.2879	0.0041
40.3320	21.9727	179.1159	0.0041	40.1163	22.9651	171.5116	0.0040	39.6357	21.8978	181.9271	0.0039
49.9020	32.5098	178.3811	0.0039	49.9804	32.1176	178.6275	0.0040	49.9804	32.1176	174.2707	0.0041

ตารางที่ ค.8 การศึกษาผลกระทบของ IS ต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ GAC พีเอช 7 background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

C_i (mg/L)	เติม NaCl 10 mM			เติม NaCl 20 mM			เติม NaCl 50 mM				
	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GAC weight (g)
5.1656	1.4945	12.8811	0.0114	5.4699	1.1538	15.1441	0.0114	5.2927	1.7692	12.3629	0.0114
10.6529	2.8571	27.3535	0.0114	10.5688	3.7500	23.9257	0.0114	10.5771	4.7500	20.4459	0.0114
15.1320	4.3516	37.8259	0.0114	15.1154	6.1923	31.3090	0.0114	14.9231	4.5385	36.4372	0.0114
20.1538	11.1868	31.4633	0.0114	20.4038	10.9231	33.2659	0.0114	20.0192	8.3846	40.8232	0.0114
24.8571	10.1099	51.7447	0.0114	25.6731	12.8077	45.1417	0.0114	25.3077	17.0962	28.8124	0.0114
29.9341	17.0330	45.2670	0.0114	30.5192	15.7692	51.7544	0.0114	30.0577	21.3462	30.5668	0.0114
40.2418	19.0989	74.1855	0.0114	41.0192	29.3846	40.8232	0.0114	41.1346	21.9808	67.2065	0.0114
50.0440	25.7582	85.2130	0.0114	51.1346	33.9423	60.3239	0.0114	50.8846	34.8269	56.3428	0.0114

ตารางที่ ค.9 การศึกษาผลกระทบของ IS ต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ GO ที่ไอออนิก strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เติม NaCl 10 mM				เติม NaCl 20 mM				เติม NaCl 50 mM			
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	GO weight (g)
4.7554	3.8685	18.1818	0.0020	4.7176	3.8491	17.8046	0.0020	4.6610	3.7524	18.6267	0.0020
9.9071	8.4522	29.8242	0.0020	9.7938	8.6654	23.1335	0.0020	9.9259	8.7427	24.2553	0.0020
14.8512	13.1335	35.2128	0.0020	14.8700	13.3075	32.0309	0.0020	15.3229	13.6557	34.1779	0.0020
19.9462	17.9691	40.5319	0.0020	19.5311	17.5822	39.9516	0.0020	17.3987	15.4159	40.6480	0.0020

ตารางที่ ค.10 การศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ PAC พีเอช 7 background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

KCl				NaNO ₃				CaCl ₂			
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	PAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	PAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	PAC weight (g)
4.8011	0.0497	48.7317	0.0039	5.4788	0.6276	49.7562	0.0039	5.5327	0.1326	54.0010	0.0020
10.1071	1.0233	93.1669	0.0039	10.5523	1.4017	93.8530	0.0039	12.3590	3.2197	91.3930	0.0020
14.4704	4.6320	100.9069	0.0039	15.0628	5.6695	96.3416	0.0039	20.6250	8.5227	121.0227	0.0020
19.5332	9.0664	107.3517	0.0039	20.2720	7.3274	132.7648	0.0039	31.1742	17.9924	131.8182	0.0020
24.9551	12.5853	126.8701	0.0039	25.7531	12.8452	132.3892	0.0039	41.5152	27.5758	132.7561	0.0021
30.2334	17.5943	129.6322	0.0039	30.7531	17.5314	135.6078	0.0039				
40.8438	26.1939	150.2555	0.0039	41.8201	29.2469	128.9561	0.0039				
49.7666	36.5171	135.8928	0.0039	50.4184	36.1506	146.3362	0.0039				

ตารางที่ ค.10 (ต่อ) การศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ PAC พีเอช 7
background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MgCl ₂				Na ₂ CO ₃				Na ₂ SO ₄			
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	PAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	PAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	PAC weight (g)
4.7751	0.0891	46.8597	0.0040	4.8011	0.0359	48.8735	0.0039	4.7884	0.1024	46.8597	0.0040
9.9822	1.2294	87.5278	0.0040	10.3596	2.1544	84.1559	0.0039	10.0535	0.4098	96.4365	0.0040
14.3515	5.2510	91.0042	0.0040	14.7576	4.7935	102.1958	0.0039	14.6025	1.6036	129.9895	0.0040
19.7280	7.6570	120.7102	0.0040	19.9282	8.2047	120.2412	0.0039	19.6234	7.9916	116.3180	0.0040
24.4770	10.3385	141.3846	0.0040	24.8294	13.2316	118.9523	0.0039	24.8536	12.1130	127.4059	0.0040
29.8745	15.6067	142.6778	0.0040	30.1975	16.5350	140.1280	0.0039	29.8536	14.7699	150.8368	0.0040
41.0460	24.0377	170.0837	0.0040	41.2029	28.0790	134.6039	0.0039	41.1925	26.9247	142.6778	0.0040
				49.4434	34.5242	153.0175	0.0039	49.5816	35.0628	145.1883	0.0040

ตารางที่ ค.11 การศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ GAC พีเอช 7 background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

KCl				NaNO ₃				CaCl ₂			
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)
5.2020	0.6472	16.5630	0.0110	5.0824	3.2317	6.5514	0.0113	5.2020	0.3894	17.1877	0.0112
10.5771	3.9942	23.9376	0.0110	11.3355	3.4501	27.9129	0.0113	10.5771	2.2068	29.8938	0.0112
15.1923	6.2613	32.4763	0.0110	16.1154	5.7181	36.8047	0.0113	15.1923	4.7493	37.2964	0.0112
20.3654	12.0651	30.1828	0.0110	21.3462	10.9615	36.7597	0.0113	20.3654	9.4318	39.0485	0.0112
25.4615	14.7885	38.8112	0.0110	26.2692	13.1731	46.3581	0.0113	25.4615	14.3326	39.7463	0.0112
30.6154	19.7692	39.4406	0.0110	31.6154	17.6538	49.4214	0.0113	30.6154	18.0303	44.9467	0.0112
41.0769	25.0577	58.2517	0.0110	41.7500	25.3654	57.9986	0.0113	41.0769	26.3447	52.6151	0.0112
51.1346	37.3654	50.0699	0.0110	51.8462	32.6923	67.8012	0.0113	51.1346	36.3636	52.7535	0.0112

ตารางที่ ค.11 (ต่อ) การศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ GAC ทีไอเอช 7 background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MgCl ₂				Na ₂ CO ₃				Na ₂ SO ₄			
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)
5.1690	1.0181	14.6933	0.0113	5.1855	1.0000	14.0689	0.0119	5.1566	1.4468	12.7924	0.0116
10.6265	2.2300	29.7223	0.0113	10.4946	3.6077	23.1494	0.0119	10.4204	3.4270	24.1152	0.0116
15.2115	7.7115	26.5487	0.0113	15.2308	5.3791	33.1150	0.0119	15.2115	5.0067	35.1891	0.0116
19.0577	8.4423	37.5766	0.0113	20.4423	8.3306	40.7117	0.0119	19.8654	6.2366	46.9958	0.0116
25.7692	14.5769	39.6188	0.0113	25.3654	13.0962	41.2411	0.0119	25.5385	10.0000	53.5809	0.0116
30.5577	16.5000	49.7617	0.0113	30.5385	18.2454	41.3213	0.0119	30.6538	15.8269	51.1273	0.0116
40.2308	24.6346	55.2076	0.0113	40.2400	27.6154	42.4357	0.0119	40.8269	25.1077	54.2043	0.0116
50.7115	35.3077	54.5269	0.0113	50.7308	37.9731	42.8830	0.0119	50.2885	34.6346	53.9788	0.0116

ตารางที่ ค.12 การศึกษาผลกระทบของอิออนต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ GO พีเอช 7 background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

KCl				NaNO ₃				CaCl ₂			
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GO weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GO weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GO weight (g)
4.6799	3.6944	20.2031	0.0020	5.5480	5.0797	9.5994	0.0020	4.4279	2.7307	34.7928	0.0010
9.8882	8.4720	29.0329	0.0020	10.4354	9.4197	20.8221	0.0020	9.3703	6.5537	57.7401	0.0010
14.8700	13.0754	36.7892	0.0020	15.5682	14.0039	32.0696	0.0020	15.1578	12.3164	58.2486	0.0010
20.3425	18.2979	41.9149	0.0020	20.0783	18.3559	35.3095	0.0020	19.6224	16.5725	62.5235	0.0010

ตารางที่ ค.12 (ต่อ) การศึกษาผลกระทบของไอออนต่อการดูดซับ CBZ ด้วยตัวกลางดูดซับ GO พีเอช 7
background ionic strength 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MgCl ₂				Na ₂ CO ₃				Na ₂ SO ₄			
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	GAC weight (g)
4.9441	3.4816	29.9807	0.0020	4.9252	4.2747	13.3366	0.0020	4.6610	3.8685	16.2476	0.0020
9.5297	7.5629	40.3191	0.0020	9.6617	8.7037	19.6404	0.0020	9.5485	7.5300	41.3801	0.0020
12.9830	10.5222	50.4449	0.0020	14.5870	13.1439	29.5828	0.0020	14.5304	11.4700	62.7369	0.0020
14.7568	11.9787	56.9507	0.0020	19.0216	17.3559	34.1460	0.0020	18.6064	15.2224	69.3714	0.0020

ตารางที่ ค.13 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant CBZ			Competitor SMX			PAC weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.7404	0.1478	44.8062	29.3212	18.3895	106.6504	0.0041
9.7792	1.2705	83.0115	29.2815	21.3595	77.2877	0.0041
14.5843	3.5892	107.2691	32.3707	26.1812	60.3859	0.0041
19.4815	6.8071	123.6530	29.5208	24.3452	50.4943	0.0041
24.2428	11.7240	122.1344	29.6253	25.3787	41.4296	0.0041
30.0423	16.1709	135.3306	29.6224	25.6015	39.2283	0.0041
40.5238	24.3540	157.7549	29.6381	26.0840	34.6735	0.0041
50.3371	33.6944	162.3678	29.5345	26.4939	29.6642	0.0041

ตารางที่ ค.14 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant SMX			Competitor CBZ			PAC weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.9594	4.1424	8.1700	29.2635	12.9948	162.6867	0.0040
9.2982	8.2529	10.4536	29.5842	23.7014	58.8278	0.0040
14.0746	12.1804	18.9416	29.6297	27.5090	21.2069	0.0040
19.3893	16.6590	27.3035	29.5704	23.9891	55.8130	0.0040
24.5264	21.8803	26.4604	29.6792	27.3984	22.8082	0.0040
29.8392	27.0514	27.8776	29.9728	27.2840	26.8880	0.0040
39.8895	37.9395	19.4998	29.9625	27.8226	21.3987	0.0040
51.0957	48.5762	25.1945	30.1307	28.2999	18.3080	0.0040

ตารางที่ ค.15 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant CBZ			Competitor SMX			GAC weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.6603	3.2188	5.0138	30.5549	28.3054	7.8245	0.0115
8.1896	5.6323	8.8951	30.3367	27.6541	9.3307	0.0115
14.0753	6.0480	27.9209	30.1629	24.5045	19.6814	0.0115
19.6568	8.2820	39.5644	30.4811	28.9938	5.1733	0.0115
25.0148	16.6662	29.0388	30.2512	22.9501	25.3951	0.0115
29.9737	17.0256	45.0368	30.1915	24.8917	18.4341	0.0115
39.9930	24.1058	55.2598	30.2847	26.2217	14.1323	0.0115
50.8310	31.2686	68.0431	29.7097	25.5010	14.6390	0.0115

ตารางที่ ค.16 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant SMX			Competitor CBZ			GAC weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.2666	3.6828	1.9957	30.0073	18.1004	40.7073	0.0117
10.0650	8.2112	6.3380	29.9913	17.4467	42.8877	0.0117
15.0940	13.2057	6.4556	30.0785	21.6863	28.6911	0.0117
20.0680	16.7218	11.4400	29.9698	17.8713	41.3623	0.0117
25.1777	20.7813	15.0305	30.0526	11.2519	64.2759	0.0117
29.7949	24.7300	17.3157	30.2257	15.4216	50.6125	0.0117
40.0521	34.8876	17.6565	30.1720	18.5887	39.6008	0.0117

ตารางที่ ค.17 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GO (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant CBZ			Competitor SMX			GO weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.6111	4.0131	12.2592	20.9906	20.1373	17.4928	0.0020
9.2843	8.2760	20.6704	20.8251	20.1030	14.8028	0.0020
14.7803	13.6172	23.8443	20.7860	20.7704	0.3204	0.0020

ตารางที่ ค.18 การดูดซับเชิงสารผสม SMX โดยมี CBZ เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GO (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant SMX			Competitor CBZ			GO weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.8936	4.6752	4.4765	19.3159	18.4644	17.4545	0.0020
9.8119	9.0450	15.7206	19.1913	17.8052	28.4137	0.0020
15.4603	14.4239	21.2468	19.3066	17.7897	31.0960	0.0020
19.7776	18.7195	21.6921	19.2417	17.8677	28.1680	0.0020

ตารางที่ ค.19 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี Tannic เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant CBZ			Competitor TNC			PAC weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.7813	0.6341	40.4606	8.2841	3.6778	44.9391	0.0041
10.1590	2.7540	72.2436	8.6305	3.1229	53.7326	0.0041
14.9723	6.3977	83.6552	9.1243	3.1504	58.2818	0.0041

ตารางที่ ค.20 การดูดซับเชิงสารผสม CBZ โดยมี Tannic เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ GAC (พีเอช เท่ากับ 7 ค่า Background ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลาร์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

Dominant CBZ			Competitor TNC			GAC weight (g)
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	Q_e (mg/g)	
4.8134	0.6220	14.8368	9.6240	2.7400	24.3682	0.0113
9.8057	2.7661	24.9191	9.2803	4.6433	16.4143	0.0113
14.8878	5.7288	32.4213	8.4457	3.7571	16.5967	0.0113

ภาคผนวก ง
การคำนวณ



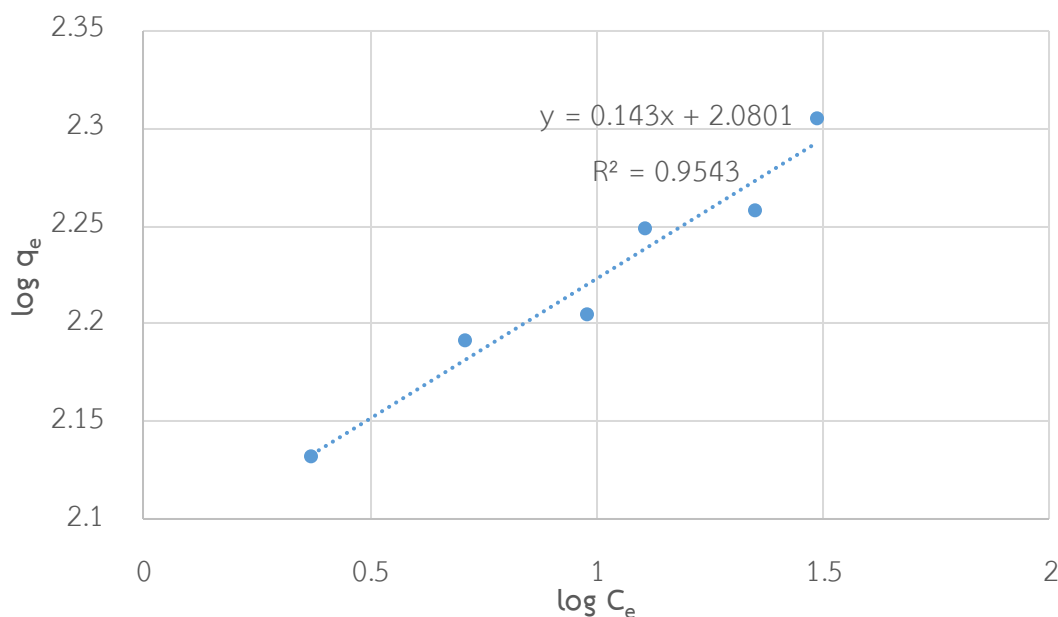
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่และตัวแปรตามแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิช

- 1) ป้อนข้อมูล c_e และ q_e
- 2) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log c_e$ และ $\log q_e$ ตามสมการ

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log c_e + \log K_F \dots \dots \dots (ง.1)$$

- 3) คำนวณหาค่า K_F และ n จาก จุดตัดแกน Y และ ความชันของกราฟตามลำดับ



รูปที่ ง.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log c_e$ และ $\log q_e$

$$\log K_F = 2.0801$$

$$K_F = 10^{2.0801} = 120.25 \text{ หน่วยตาม } c_e \text{ และ } q_e$$

$$\frac{1}{n} = 0.143$$

$$n = 6.99$$

จะได้ ค่า K_F และ n จากการทดลอง

- 4) คำนวณค่า q_e จากทฤษฎีจาก K_F และ n ที่คำนวณได้ในข้อ 3 และหาความต่างกำลังสองระหว่าง ค่า q_e จากทฤษฎี และค่า q_e จากการทดลอง และหาผลรวมของผลต่างทั้งหมด
- 5) เลือกเซลล์ผลรวมและเลือกคำสั่ง DATA จาก toolbar เลือก Solver ดังรูป ง.2
- 6) เลือกกำหนดเซลล์ที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณ โดยมีเงื่อนไขให้ค่าผลรวมของผลต่างทั้งหมดจากข้อ 4 มีค่าต่ำที่สุด จะได้ค่า ค่า K_F และ n ที่เหมาะสม

The Solver Parameters dialog box is configured as follows:

- Set Objective:** \$R\$540
- To:** Min Max Value Of: 0
- By Changing Variable Cells:** \$P\$38:\$P\$39
- Subject to the Constraints:** (Empty list)
- Make Unconstrained Variables Non-Negative
- Select a Solving Method:** GRG Nonlinear
- Solving Method:** Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

The spreadsheet data is as follows:

	O	P	Q	R	S	T	U
K _f		114.0622914					
n		6.097040537					
			SSD	476.9489396			
C _e		Q _e	MODEL (Q _e)	SD			
0.031520883	50.37786048	64.69805228	205.0678933				
0.275807723	101.969375	92.34081734	92.709122				
2.348305753	135.5492378	131.2051987	18.87067515				
5.130023641	155.3559393	149.1459995	38.56335209				
9.523246651	160.0560638	165.0731882	25.17153715				
12.83168317	177.100787	173.3469168	14.09154118				
22.31683168	180.9596344	189.8177003	78.46533169				
30.57425743	201.8786494	199.876279	4.009487126				

รูปที่ ง.2 การใช้คำสั่ง solver เพื่อให้ได้ค่า K_f และ n ที่เหมาะสม

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า K_d และค่า A โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิช

ขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยเสนอวิธีคำนวณค่า K_d และ ค่า A ของการดูดซับเชิงผสม CBZ โดยมี SMX เป็น competitor บนตัวกลางดูดซับ PAC

- 1) คำนวณหาค่า K_F และ n ที่เหมาะสมของไอโซเทอร์มการดูดซับ CBZ บนตัวกลางดูดซับ PAC ทั้งในระบบการดูดซับเชิงเดี่ยวและการดูดซับเชิงผสม
- 2) นำค่า K_F และ n ที่ได้จากข้อ 1) มาคำนวณหาค่า q_e ของการดูดซับเชิงเดี่ยวและเชิงผสม โดยกำหนด c_e ให้เท่ากับ 0.01 เท่าของค่าการละลายของ CBZ ซึ่งนั่นคือ $0.01 \times 112 = 11.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร (ตัวอย่างดังตาราง ง.1)

ตารางที่ ง.1 ตัวอย่างการคำนวณค่า q_e ของ CBZ ในระบบการดูดซับเชิงเดี่ยวและเชิงผสม

c_e	bi-solute		single solute	
	q_e	k'_d	q_e	k_d
0.1	47.06771577	470.6771577	82.5443708	825.4437
0.2	54.60720987	273.0360494	90.9921781	454.9609
0.3	59.56563601	198.55212	96.32914039	321.0971
0.4	63.35441016	158.3860254	100.3045561	250.7614
0.5	66.45839713	132.9167943	103.5007657	207.0015
0.6	69.10709673	115.1784946	106.1877171	176.9795
0.7	71.42873089	102.0410441	108.5138508	155.0198
0.8	73.50277181	91.87846477	110.5699873	138.2125
0.9	75.38213688	83.75792987	112.4159431	124.9066
1	77.10396778	77.10396778	114.0933054	114.0933
1.1	78.69540934	71.54128122	115.6322147	105.1202
1.2	80.17694663	66.81412219	117.0552465	97.54604
1.3	81.56444696	62.74188227	118.3797687	91.06136

3) คำนวณค่า K_d จาก

$$K_d = \frac{\text{มวลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ} (q_e)}{\text{มวลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสารละลาย} (c_e)}$$

โดย K'_d = ค่า K_d ของมลสารจากระบบดูดซับเชิงผสม

K_d = ค่า K_d ของมลสารจากระบบดูดซับเชิงผสม

4) คำนวณค่า A (การแข่งขัน) จาก

$$A = (K_d - K'_d) / K_d \times 100 \dots \dots \dots (จ.2)$$



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมัชฌิมา ทองจีน สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 15 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 11 - 13 พฤษภาคม 2559

