

การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากตะกอนน้ำประปา

น.ส. เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากตะกอนน้ำประปา

น.ส. เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Fluoride and nitrate adsorption on water treatment sludge

Miss Benjaphorn Songsakunrungrueng

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

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับจาก
ตะกอนน้ำประปา

โดย

น.ส. เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เอมมา อาสนจินดา)

เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง : การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับจาก ตะกอนน้ำประปา (Fluoride and nitrate adsorption on water treatment sludge) อ.ที่ปรีชาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.สุธา ขาวเอียง, 215 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ดินตะกอนที่เหลือทิ้งจากโรงผลิตน้ำประปามาผลิตเป็นวัสดุดูดซับ แบบเกล็ดเพื่อดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำ โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ศึกษาผลของการเพิ่ม ประสิทธิภาพตัวดูดซับด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อน กรด และด่าง และศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของตัวดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ กลไกการดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับของฟลูออไรด์ และไนเตรทในน้ำ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของไอออนอื่นๆที่มีผลต่อการดูดซับ และการชะละลาย ของตัวดูดซับจากดินตะกอนอีกด้วย ผลการศึกษาพบว่าตัวดูดซับแบบเกล็ดที่เตรียมจากดินตะกอน สามารถดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทได้ ยกเว้นตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยด่าง โดยการกระตุ้นตัวดูดซับ ด้วยความร้อนและกรดพบว่าทำให้รูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น การดูดซับทั้งหมดเข้ากันได้กับ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเสมือนและใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 4 ชั่วโมง โดยการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วขึ้น การดูดซับฟลูออไรด์ ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ส่วนตัวดูด ชับที่กระตุ้นด้วยกรดสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ส่วนการดูดซับไนเตรททั้งหมดสอดคล้อง กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดมี ประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด โดยค่าความจุการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทเท่ากับ 9.17 และ 5.77 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับการดูดซับในน้ำมลสารรวมพบว่าการดูดซับฟลูออไรด์และ ไนเตรทลดลง นอกจากนี้ คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และซัลเฟตไอออนส่งผลให้การดูดซับฟลูออไรด์ ลดลง ตามลำดับ และคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟตไอออนส่งผลให้การดูดซับ ไนเตรทลดลง ตามลำดับ และไอออนบวก ได้แก่ โซเดียมและแคลเซียมไม่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ และไนเตรท ส่วนการชะละลายของมลสารอื่นๆ ในตะกอน จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำเบื้องต้น พบว่าน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำบริโภคตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970391021 : MASTER OF ENGINEERING

KEYWORDS: WATER TREATMENT SLUDGE / ADSORPTION / FLUORIDE / NITRATE / ACID
ACTIVATION / THERMAL ACTIVATION

BENJAPHORN SONGSAKUNRUNGRUENG : Fluoride and nitrate adsorption on
water treatment sludge. ADVISOR: ASSOC. PROF.SUTHA KHAODHIAR, Ph.D.,
215 pp.

This research studied the use of water treatment sludge to produce pellet adsorbents to adsorb fluoride and nitrate in water. The experiment was carried out by batch adsorption to investigate the effects of the improvement of the adsorbents by heat, acid and alkali, respectively. Then, the physical and chemical characteristics of the adsorbents were analyzed. In addition, absorption kinetics and adsorption isothermal of fluoride and nitrate in water were tested at different conditions. Moreover, the influence of other ions on adsorption and leaching test of the water treatment sludge were investigated. The results showed that the adsorbents prepared from the sludge except alkaline treated adsorbents were capable of adsorbing fluoride and nitrate. The thermal and acid activation adsorbents were found to have the higher porosity and specific surface area. All adsorption experiments were compatible with second order kinetics and reached the equilibrium within 4 hours. Fluoride adsorption with thermal-activated water sludge adsorbents was fitted with Langmuir and Freundlich isotherms. However, nitrate adsorption of acid-activated adsorbents corresponds to the Langmuir isotherm. At thermal activation 500 degree Celsius and 0.1 molar of acid, the adsorbent was found to have the best efficiency for fluoride and nitrate adsorption and the adsorption capacity was 9.17 mg/g and 5.77 mg/g, respectively. Furthermore, the presence of carbonate, bicarbonate and sulfate ions resulted in lower fluoride adsorption. Carbonate bicarbonate, chloride and sulfate ions contributed to lower nitrate adsorption onto the adsorbents. However, the positive charge ions i.e., sodium and calcium did not affect the absorption of fluoride and nitrate. In terms of leaching test, the results showed that the leachable water was under the standard of drinking water in accordance with the standards of the Department of Health.

Department: Department of Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2018

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว และ ดร.ดวงสิทธิ์ เต็นเพชรกุล ที่เอื้อเฟื้อกรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขและสนับสนุนในด้านต่างๆ ตลอดจนสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภากาศ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล และ ดร.เอมมา อาสนจินดา ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ ภาควิชากรรมสิ่งแวดลอม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชากรรมสิ่งแวดลอม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 10 อาคารวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสาร และของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ สถานที่ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ประปา ปทุมธานี จำกัด ที่อนุเคราะห์ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำประปา และการจัดการตะกอน

ความดีของวิทยานิพนธ์ขอมอบแต่ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ผู้มีพระคุณสูงสุด ต่อผู้วิจัย ผู้ที่ให้ความรัก การสนับสนุน ทางด้านกำลังใจ คำปรึกษา และกำลังใจ ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ และมอบแต่สิ่งที่ดีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

ทำยนี้ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษา และดำเนินงานวิจัย

เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	6
2.1.1 แหล่งกำเนิดตะกอนในโรงผลิตน้ำประปา.....	7
2.1.2 กำลังการผลิตน้ำประปาและปริมาณตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา.....	7
2.1.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอน.....	8
2.1.4 กระบวนการกำจัดตะกอน.....	12
2.2 กระบวนการดูดซับ.....	14
2.2.1 ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับในวัฏภาคน้ำ.....	14
2.2.2 กลไกการดูดซับ.....	15

2.2.3	ประเภทของการดูดซับ.....	16
2.2.4	ปัจจัยทางกายภาพ-เคมีที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับมลสารในวัฏภาคน้ำ.....	18
2.2.5	จลนพลศาสตร์การดูดซับในวัฏภาคน้ำ.....	20
2.2.6	ไอโซเทอมการดูดซับ.....	21
2.3	การกระตุ้นตัวดูดซับ.....	24
2.3.1	การกระตุ้นทางกายภาพ.....	24
2.3.2	การกระตุ้นทางเคมี.....	25
2.4	ฟลูออไรด์.....	26
2.4.1	แหล่งที่มาของฟลูออไรด์.....	26
2.4.2	ผลกระทบของฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ.....	27
2.4.3	การปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำใต้ดินของประเทศไทย.....	29
2.4.4	การควบคุมฟลูออไรด์.....	30
2.5	ไนเตรท.....	30
2.5.1	แหล่งที่มาของไนเตรท.....	31
2.5.2	ผลกระทบของไนเตรทที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ.....	33
2.5.3	การปนเปื้อนไนเตรทในแหล่งน้ำใต้ดินของประเทศไทย.....	34
2.5.4	การควบคุมไนเตรท.....	35
2.6	กลไกการเกิดการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตะกอน.....	37
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.7.1	การดูดซับมลสารโดยใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับ.....	39
2.7.2	การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน.....	40
2.7.3	การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน.....	43
2.8	บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3	แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	53

3.1	แผนการทดลอง.....	53
3.2	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับงานวิจัย.....	55
3.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	55
3.2.2	สารเคมี.....	56
3.3	การเตรียมตัวดูดซับ สารละลาย ที่ใช้ในงานวิจัย.....	57
3.3.1	การเตรียมตัวดูดซับ.....	57
3.3.2	การเตรียมสารละลาย.....	59
3.4	การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	61
3.5	การศึกษาการดูดซับและการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับจากตะกอน.....	62
3.5.1	การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำมลสารเดี่ยว.....	63
3.5.2	การศึกษาการดูดซับไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยว.....	64
3.5.3	การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีร่วมกัน.....	69
3.5.4	การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม.....	71
3.6	การศึกษาผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับ.....	72
3.7	การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ.....	77
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	79
4.1	การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	79
4.1.1	ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนของตัวดูดซับ.....	79
4.1.2	ผลการศึกษาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอน.....	80
4.1.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	81
4.1.4	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน.....	82
4.1.5	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	84
4.1.6	ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ.....	86

4.1.7 ผลการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว.....	87
4.2 ผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอน.....	88
4.2.1 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำมลสารเดี่ยว.....	88
4.2.1.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์.....	88
4.2.1.2 การศึกษากลไกการดูดซับฟลูออไรด์.....	99
4.2.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์.....	102
4.2.2 การศึกษาการดูดซับในเตรทในน้ำมลสารเดี่ยว.....	116
4.2.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับในเตรท.....	116
4.2.1.2 การศึกษากลไกการดูดซับในเตรท.....	124
4.2.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในเตรท.....	126
4.2.3 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ และเคมีร่วมกัน.....	136
4.2.4 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม.....	152
4.3 ผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอน.....	154
4.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับเพิ่มเติม.....	157
4.5 การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ.....	159
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	161
5.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	161
5.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว.....	162
5.3 การศึกษากลไกการดูดซับ.....	162
5.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว.....	163
5.5 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยวด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทาง กายภาพและเคมีร่วมกัน.....	163
5.6 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม.....	164

5.7 การศึกษาผลของความเข้มข้นไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับ.....	164
5.8 การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ.....	164
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	166
6.1 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์.....	166
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	166
ภาคผนวก.....	169
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	170
ภาคผนวก ข การศึกษากระบวนการดูดซับ.....	181
ภาคผนวก ค ตัวอย่างภาพทดลอง.....	198
ภาคผนวก ง ตารางมาตรฐานคุณภาพน้ำ.....	202
บรรณานุกรม.....	206
ประวัติผู้เขียน.....	215

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2- 1 ปริมาณการผลิตน้ำประปาและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น	8
ตารางที่ 2- 2 ของเสียประเภทตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา	8
ตารางที่ 2- 3 ตะกอนดินลักษณะต่างๆ จากชั้นตอนหลังการรีดตะกอนของกระบวนการผลิตน้ำประปา .	9
ตารางที่ 2- 4 องค์ประกอบของตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา	10
ตารางที่ 2- 5 ปริมาณสารอันตรายของตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา.....	11
ตารางที่ 2- 6 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี	17
ตารางที่ 2- 7 การสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของโครงสร้างทางเคมีของสารที่อยู่ในดิน	25
ตารางที่ 2- 8 ตัวอย่างปริมาณฟลูออไรด์ในประเทศไทย.....	29
ตารางที่ 2- 9 ตัวอย่างตัวดูดซับไนเตรทที่มีประสิทธิภาพต่างกัน.....	36
ตารางที่ 2- 10 ตัวอย่างตัวดูดซับที่ใช้ในการกำจัดไนเตรท.....	37
ตารางที่ 2- 11 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับมลสารต่างๆ ในน้ำ	47
ตารางที่ 2- 12 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน.....	48
ตารางที่ 2- 13 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน.....	50
ตารางที่ 2- 14 งานวิจัยที่ทำการศึกษา.....	52
ตารางที่ 3- 1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	61
ตารางที่ 3- 2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	66
ตารางที่ 3- 3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ	68
ตารางที่ 4- 1 ปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตะกอน.....	81
ตารางที่ 4- 2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1..	84

ตารางที่ 4- 3	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน	92
ตารางที่ 4- 4	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด	96
ตารางที่ 4- 5	สรุปเวลาในการเข้าสู่สมดุล และแบบจำลองจลนพลศาสตร์.....	98
ตารางที่ 4- 6	ค่าคงที่ของการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค.....	101
ตารางที่ 4- 7	ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ SA, S300, S400, S500, S600 และ S700.....	104
ตารางที่ 4- 8	ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ SA, SA0.1, SA0.5 และ SA1	110
ตารางที่ 4- 9	สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม	113
ตารางที่ 4- 10	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ	114
ตารางที่ 4- 11	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน	119
ตารางที่ 4- 12	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด ...	123
ตารางที่ 4- 13	สรุปเวลาเข้าสู่สมดุลและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ	124
ตารางที่ 4- 14	ค่าคงที่กลไกการดูดซับไนเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค.....	126
ตารางที่ 4- 15	ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ SA, S400, S500 และ S600.....	129
ตารางที่ 4- 16	ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ SA, SA0.1 และ SA0.5	133
ตารางที่ 4- 17	สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม.....	135
ตารางที่ 4- 18	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน และกรดรวมกัน.....	139
ตารางที่ 4- 19	ค่าคงที่กลไกการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500	140

ตารางที่ 4- 20 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500.....	142
ตารางที่ 4- 21 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม.....	144
ตารางที่ 4- 22 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดร่วมกัน.....	147
ตารางที่ 4- 23 ค่าคงที่กลไกการดูดซับไนเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500	148
ตารางที่ 4- 24 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500.....	150
ตารางที่ 4- 25 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม.....	152
ตารางที่ 4- 26 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ S500&A0.1	157
ตารางที่ 4- 27 คุณภาพน้ำเบื้องต้นหลังใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับ	160
ตารางที่ ก.2. 1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน ของตัวดูดซับ SN	179
ตารางที่ ก.2. 2 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ S500	179
ตารางที่ ก.2. 3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ SA1	180
ตารางที่ ก.2. 4 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ SB1	180
ตารางที่ ข.1. 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SN, S300, S400, S500, S600 และ S700.....	182
ตารางที่ ข.1. 2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SA0.1, SA0.5, SA1, SB0.1, SB0.5 และ SB1.....	183
ตารางที่ ข.1. 3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SN, S300, S400, S500, S600, S700, SA0.1, SA0.5, SA1, SB0.1, SB0.5 และ SB1	184

ตารางที่ ข.2. 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5.....	185
ตารางที่ ข.2. 2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5	186
ตารางที่ ข.3. 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทโดยใช้ S500&A0.1 และ SA0.1&500.....	187
ตารางที่ ข.4. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SN, S300 และ S400.....	188
ตารางที่ ข.4. 2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ S500, S600 และ S700	189
ตารางที่ ข.4. 3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SA0.1 และ SA0.5.....	190
ตารางที่ ข.5. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500 และ S600.....	191
ตารางที่ ข.5. 2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ SA0.1 และ SA0.5	192
ตารางที่ ข.5. 3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5	193
ตารางที่ ข.6. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ S500&A0.1 และ SA0.1&500	194
ตารางที่ ข.6. 2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ S500&A0.1 และ SA0.1&500.....	195
ตารางที่ ข.7. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม.....	196
ตารางที่ ข.8. 1 ผลของคาร์บอนแอคทีฟ ไฮโดรเจนคาร์บอนแอคทีฟ คลอไรด์ และซิลิเกตไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทของตัวดูดซับ S500&A0.1.....	197
ตารางที่ ข.8. 2 ผลของโซเดียมและแคลเซียมไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทของตัวดูดซับ S500&A0.1	197
ตารางที่ ง. 1 แสดงมาตรฐานอุตสาหกรรมน้ำบริโภค.....	203

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2- 1	กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	6
ภาพที่ 2- 2	ขั้นตอนการกำจัดตะกอน	12
ภาพที่ 2- 3	แสดงกลไกการดูดซับ	15
ภาพที่ 2- 4	อาการของโรคฟันตกกร.....	28
ภาพที่ 2- 5	วัฏจักรของไนโตรเจน.....	32
ภาพที่ 2- 6	การดูดซับฟลูออไรด์ที่พื้นที่ผิวของออกไซด์.....	38
ภาพที่ 2- 7	พื้นผิวออกไซด์ที่แสดงประจุลบ	38
ภาพที่ 2- 8	การแทนที่หมู่ไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวออกไซด์ด้วยหมู่แอนไอออนอื่นๆ.....	38
ภาพที่ 3- 1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	54
ภาพที่ 3- 2	การเตรียมตัวดูดซับและสารละลาย	60
ภาพที่ 3- 3	ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	65
ภาพที่ 3- 4	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	67
ภาพที่ 3- 5	ขั้นตอนการทดลองการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับที่กระตุ้นทางกายภาพและเคมีร่วมกัน	69
ภาพที่ 3- 6	สรุปขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	78
ภาพที่ 4- 1	ผลการวิเคราะห์ TGA ของตัวดูดซับ SN.....	79
ภาพที่ 4- 2	ผลการวิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบในตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และSB1 ด้วย เครื่อง XRD	82
ภาพที่ 4- 3	ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1 เมื่อสัญลักษณ์ เส้นทึบ คือ การดูดซับ และสัญลักษณ์เส้นประ คือ การคายซับ	83
ภาพที่ 4- 4	สเปกตรัม FT-IR ของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1.....	85
ภาพที่ 4- 5	ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ SN ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	86
ภาพที่ 4- 6	ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ S500 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	86

ภาพที่ 4- 7 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูด SA1 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	87
ภาพที่ 4- 8 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ SB1 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	87
ภาพที่ 4- 9 ประจุนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500	88
ภาพที่ 4- 10 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน.....	89
ภาพที่ 4- 11 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) S300 (ค) S400 (ง) S500 (จ) S600 (ฉ) S700	91
ภาพที่ 4- 12 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด.....	93
ภาพที่ 4- 13 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 (ค) SA0.5 (ง) SA1 95	
ภาพที่ 4- 14 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยต่าง	97
ภาพที่ 4- 15 กลไกการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (ก) SN (ข) S300 (ค) S400 (ง) S500 (จ) S600 (ฉ) S700 (ช) SA0.1 และ (ญ) SA0.5.....	101
ภาพที่ 4- 16 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน	102
ภาพที่ 4- 17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) S300 (ค) S400 (ง) S500 (จ) S600 และ (ฉ) S700 กับแบบจำลอง ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรุนดลิช เส้นตรง และเทมกิน.....	108
ภาพที่ 4- 18 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด	108
ภาพที่ 4- 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 (ค) SA0.5 (ง) SA1กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ แลงเมียร์ ฟรุนดลิช เส้นตรง และเทมกิน	112
ภาพที่ 4- 20 จลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน	117
ภาพที่ 4- 21 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) S400 (ค) S500 และ (ง) S600.....	118
ภาพที่ 4- 22 จลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด	120
ภาพที่ 4- 23 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 และ (ค) SA0.5 ...	122
ภาพที่ 4- 24 กลไกการดูดซับไนเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (ก) SN (ข) S400 (ค) S500 (ง) S600 (จ) SA0.1 และ (ฉ) SA0.5	126

ภาพที่ 4- 25 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน 127

ภาพที่ 4- 26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) S400 (ค) S500 (ง) S600 131

ภาพที่ 4- 27 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด 131

ภาพที่ 4- 28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 (ค) SA0.5 134

ภาพที่ 4- 29 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดร่วมกัน 137

ภาพที่ 4- 30 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500 138

ภาพที่ 4- 31 กลไกการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 และ (ข) SA0.1&500 140

ภาพที่ 4- 32 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรด 141

ภาพที่ 4- 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500 143

ภาพที่ 4- 34 จลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่ กระตุ้นด้วยวิธีทางกายและเคมีร่วมกัน 145

ภาพที่ 4- 35 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500 146

ภาพที่ 4- 36 กลไกการดูดซับไนเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 และ (ข) SA0.1&500 148

ภาพที่ 4- 37 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่ กระตุ้นด้วยความร้อนและกรด ร่วมกัน 149

ภาพที่ 4- 38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500 151

ภาพที่ 4- 39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ S500&A0.1 ในน้ำมลสาร เดี่ยวและมลสารรวม 153

ภาพที่ 4- 40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมมูลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ S500&A0.1 ในน้ำมลสาร
เดี่ยวและมลสารรวม..... 153

ภาพที่ 4- 41 แสดงผลของไอออนลบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ 155

ภาพที่ 4- 42 แสดงผลของไอออนลบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท..... 155

ภาพที่ 4- 43 แสดงผลของไอออนบวกต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ 156

ภาพที่ 4- 44 แสดงผลของไอออนบวกต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท..... 156

ภาพที่ 4- 45 สเปกตรัม FT-IR ของตัวดูดซับ S500&A0.1..... 158

ภาพที่ 4- 46 ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500&A0.1 159

ภาพที่ ก.1. 1 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ
SN ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ.....171

ภาพที่ ก.1. 2 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ
S500 ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ 173

ภาพที่ ก.1. 3 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ
SA1 ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ 175

ภาพที่ ก.1. 4 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ
SB1 ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ..... 177

ภาพที่ ค. 1 ตะกอนอบแห้ง 103±2 องศาเซลเซียส.....199

ภาพที่ ค. 2 ตัวอย่างตะกอนเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส 199

ภาพที่ ค. 3 ตัวอย่างตะกอนเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป..... 199

ภาพที่ ค. 4 ล้างตะกอนด้วย DI water และนำไปอบให้แห้ง 200

ภาพที่ ค. 5 ตะกอนกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก 200

ภาพที่ ค. 6 ขวดเก็บตัวอย่าง 200

ภาพที่ ค. 7 ตู้อบตู้อบความร้อน 201

ภาพที่ ค. 8 เตาเผาอุณหภูมิสูง 201

ภาพที่ ค. 9 เครื่อง Ion Chromatography.....201

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำประปาในการอุปโภคบริโภคมากกว่า 7 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยการผลิตน้ำประปาจะใช้น้ำดิบจากลุ่มน้ำต่างๆ ของประเทศ ซึ่งน้ำผิวดินมักมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ และอนุภาคต่างๆ ส่วนน้ำใต้ดินจะมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ ไอออนของแร่ธาตุละลายอยู่ในน้ำ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบที่นำมาใช้ให้เหมาะสมก่อนนำน้ำนั้นมาอุปโภคและบริโภค โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาก่อให้เกิดตะกอน (Water treatment sludge) เหลือทิ้งมากกว่าปีละ 150,000 ตัน (ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกอนที่เกิดในแต่ละปีของการประปาส่วนภูมิภาคและการประปานครหลวง) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัด ทำให้ปัจจุบันมีการนำตะกอนที่เกิดขึ้นกลับไปใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด และเพื่อเป็นทางเลือกในการกำจัดตะกอนในอนาคต

จากการศึกษาสมบัติของตะกอนพบว่าสมบัติที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับมลสารในน้ำ เนื่องจากตะกอนมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยซิลิกา และอะลูมินา ในปริมาณสูง เนื้อตะกอนมีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอ เป็นดินเหนียวปนทราย ดูดซึมน้ำได้ดี ซึ่งวัสดุที่มีรูพรุนซิลิกาจะมีพื้นที่ผิวมาก พื้นที่ผิวและโครงสร้างปรับปรุงง่าย มีความเสถียรทางชีวภาพมาก (Vogt และคณะ, 2010) ทำให้มีความสามารถในการดูดซับมลสารได้ และจากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตมีการใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับมลสารต่างๆ เช่น สีย้อม โลหะหนัก ฟอสเฟต และมีการใช้วัสดุจากธรรมชาติประเภทดิน เช่น ดินเหนียว โคลนแดง มาใช้ในการดูดซับในน้ำ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำตะกอนที่มีลักษณะคล้ายดินและมีสมบัติในการดูดซับมาใช้เป็นตัวดูดซับมลสารได้น้ำ

มลสารที่งานวิจัยนี้สนใจศึกษา คือ ฟลูออไรด์และไนเตรท เนื่องจากแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับอุปโภคและบริโภคสำหรับคนไทยมีการใช้น้ำบาดาลอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นการขุดบ่อบาดาลนำน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ ซึ่งน้ำที่

นำมาใช้นั้นถ้าผ่านสายแร่ฟลูออไรด์ น้ำใต้ดินก็มีฟลูออไรด์ปนเปื้อนไปด้วย จากข้อมูลของกรมอนามัย พบว่ามีหลายจังหวัดมีแหล่งน้ำที่มีฟลูออไรด์อยู่ในระดับที่ไม่ปลอดภัยสำหรับการบริโภค เช่น จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ กาญจนบุรี เพชรบุรี อุทัยธานี ตาก ลำพูน ชลบุรี นครปฐม ภูเก็ต มีแหล่งน้ำที่ไม่ ปลอดภัยเกินกว่าร้อยละ 25 โดยพบปริมาณฟลูออไรด์ปริมาณมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งกอง ทินตสาธารณสุขทำการเก็บข้อมูลแหล่งน้ำทั่วประเทศ 58,693 ตัวอย่าง พบปริมาณฟลูออไรด์สูงสุด 16.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตำบลบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี และข้อมูลของกรมทรัพยากรน้ำ พบว่ามี บ่อบาดาลที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ร้อยละ 7 ซึ่งกระจายทุกภาคของ ประเทศ ซึ่งน้ำดื่มที่มีฟลูออไรด์ปนเปื้อนจะปราศจากสี กลิ่น รส ประชาชนจึงรับฟลูออไรด์เข้าไป สะสมในร่างกายได้อย่างไม่รู้ตัว โดยผลกระทบต่อร่างกายเกิดได้หลายทาง เช่น ผู้ที่บริโภคน้ำที่มี ฟลูออไรด์ 0.7 - 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลานานจะเกิดผลกระทบต่อฟัน ฟลูออไรด์ 3 - 6 มิลลิกรัม ต่อลิตรจะเกิดผลกระทบต่อโครงสร้างกระดูก (Crippling skeleton fluorosis) ทำให้กระดูกผิด รูปร่าง นอกจากนี้ยังมีผลต่อระบบต่อมไร้ท่อ ระบบสืบพันธุ์ และไอคิวต่ำลง เป็นต้น องค์การอนามัย โลกได้กำหนดค่ามาตรฐานปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำเพื่อการบริโภคไว้ที่ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำดื่มที่อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยในการบริโภคนั้นขึ้นอยู่กับสภาพ ภูมิอากาศในแต่ละประเทศด้วย ในประเทศแถบร้อนความเข้มข้นของฟลูออไรด์ต้องลดลงเนื่องจาก อัตรารับและการบริโภคน้ำของประชาชนจะมากกว่าประเทศแถบอื่น สำหรับประเทศไทยได้กำหนด มาตรฐานสำหรับปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำเพื่อการบริโภคไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนไนเตรทมักปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเช่นกัน โดยมีสาเหตุหลักมาจากการเกษตรกรรมที่มีการ ใช้ปุ๋ยและสารเคมีปริมาณมาก เนื่องจากสารไนเตรทเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยพบว่าแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมมีคุณภาพเสื่อมโทรมลงเนื่องจากการปนเปื้อนด้วยปุ๋ยและ สารเคมีเกษตร ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพน้ำใต้ดินที่จะนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค ซึ่งไนเตรทเป็น สาเหตุให้เกิดโรค “Blue-baby syndrome” โดยเฉพาะในเด็กทารกจะมีความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงที่สุด และอาจจะมีอาการขาดออกซิเจน หายใจไม่ออก และเสียชีวิตได้ อีกทั้งไนเตรทยังกระตุ้นให้เกิด โรคมะเร็งขึ้นได้ ดังนั้นประเทศไทยจึงกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณไนเตรทในน้ำเพื่อการบริโภคให้ มีได้ไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลกระทบของฟลูออไรด์และไนเตรทต่อร่างกายดังที่กล่าวไป ทางแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบฟลูออไรด์และไนเตรทในระดับชุมชนนั้น ทางเลือกแรกที่ควรคำนึงคือ การสำรวจแหล่งน้ำ แหล่งอื่นที่มีปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรทในระดับที่ปลอดภัยแทน สำหรับกรณีที่ไม่สามารถหาแหล่งน้ำใหม่ อาจเลือกวิธีการกำจัดฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การกรองด้วยแผ่นเยื่อ ระบบออสโมซิสแบบผันกลับ การแยกด้วยไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งวิธีดังกล่าวต้องใช้งบประมาณสูงในการติดตั้งระบบปฏิบัติการและต้องการผู้มีความรู้มาดูแลระบบ วิธีการดูดซับนั้นจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้ประโยชน์จากตะกอนที่เป็นของเสียเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปาซึ่งมีปริมาณมาก และราคาถูกมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทเพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ลดภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัด และปรับปรุงคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับการอุปโภคและบริโภค โดยศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของตะกอนและตะกอนที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อน กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก และกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ กลไกการดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับในน้ำสังเคราะห์มลสารเดี่ยวของตัวดูดซับที่กระตุ้นและไม่ได้กระตุ้นเพื่อศึกษาผลของการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยวิธีการต่างๆ ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม ศึกษาผลกระทบจากไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีผลต่อการดูดซับ และศึกษาการชะละลายของตะกอน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาเป็นตัวดูดซับ

1.2.2 ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นที่ผิวของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาด้วยความร้อน กรด และด่าง ที่มีต่อกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ และไนเตรท

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อมีฟลูออไรด์และไนเตรทร่วมกันในน้ำสังเคราะห์มลสารรวม

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำได้ เนื่องจากตะกอนมีองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมในการดูดซับ

1.3.2 การกระตุ้นตัวดูดซับด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทได้มากขึ้น เนื่องมาจากการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และเป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

1.3.3 ประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทของตัวดูดซับลดลงเมื่อมลสารทั้งคู่อยู่ร่วมกันในน้ำ เนื่องจากเกิดการแย่งชิงพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ตะกอนสารส้ม, $Al(OH)_3$) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงผลิตน้ำของบริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งเก็บตะกอนหลังผ่านขั้นตอนการรีดตะกอน ทำการเตรียมตัวอย่างตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ด้วยการนำไปอบในตู้อบให้แห้ง อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส และทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่

- ตัวดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้น
- ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 300, 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส
- ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 โมลาร์
- ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 โมลาร์

มลสารที่ทำการศึกษา ได้แก่ ฟลูออไรด์และไนเตรท โดยใช้น้ำสังเคราะห์จากสารเคมีที่เตรียมจากสารประกอบโซเดียมฟลูออไรด์และโซเดียมไนเตรท ตามลำดับ และตรวจวัดปริมาณในน้ำโดยใช้ Ion Chromatography (IC)

สถานที่ทำการวิจัยในงานวิจัยนี้ ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 10 อาคารวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย) โดยควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูด

ซั้บ คึ้กษากการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซั้บฟลูออไรด์และไนเตรท โดยการคึ้กษาจลนพลศาสตร์การดูดซั้บ กลไกการดูดซั้บ ไอโซเทอมการดูดซั้บในน้ำสังเคราะห์มลสารเดี่ยว คึ้กษากการดูดซั้บฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม คึ้กษาผลของไอออนๆ อื่นๆ ในน้ำต่อการดูดซั้บ และคึ้กษากการชะละลายของตะกอนที่นำมาใช้เป็นตั้วดูดซั้บ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงความสามารถในการดูดซั้บฟลูออไรด์และไนเตรทของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาทั้งตะกอนที่ไม่ได้กระตุ้น และตะกอนที่มีการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนกรด และต่าง

1.5.2 คึ้กษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่เหลือทิ้ง นำมาทำให้เกิดประโยชน์ในระบบบำบัดน้ำ และสามารถนำข้อมูลในงานวิจัยนี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่องานวิจัยอื่นๆ ในการนำตะกอนไปประยุกต์ใช้เพื่อไปกำจัดมลสารอื่นๆ

1.5.3 ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็้นข้อมูลพื้นฐานที่ช่วยให้มีการสนับสนุนการนำตะกอนที่เป็นของเสียเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและลดภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการ

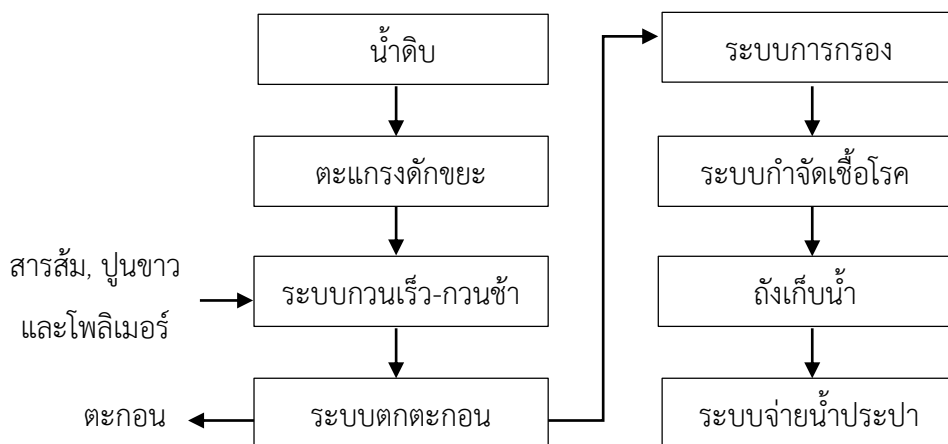
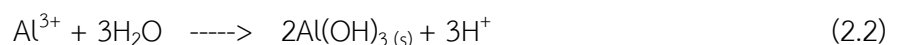
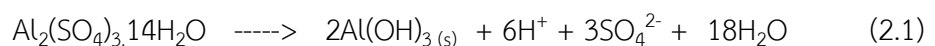
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

ปัจจุบันแหล่งน้ำในการผลิตน้ำประปามีความสกปรกมากขึ้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานโดยตรง จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมต่อการอุปโภคและบริโภคก่อนนำไปใช้ ซึ่งกระบวนการผลิตน้ำประปาก่อให้เกิดตะกอนเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มการเกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรผู้ใช้น้ำในขนาดที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี ส่งผลให้ต้องผลิตน้ำประปามากขึ้นให้เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำในประเทศ

ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (Water supply sludge) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากการตกตะกอนโดยใช้สารเคมีต่างๆ เช่น สารส้ม ปูนขาว สารประกอบเหล็ก พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และสารอินทรีย์ต่างๆ เพื่อกำจัดความขุ่นในกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในประเทศไทย คือ สารส้ม ($Al(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) ซึ่งสารส้มมีประจุบวกมาก จึงสามารถไปจับสารแขวนลอยที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำได้ เกิดเป็นตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum hydroxide; $Al(OH)_3$)



ภาพที่ 2- 1 กระบวนการผลิตน้ำประปา

2.1.1 แหล่งกำเนิดตะกอนในโรงผลิตน้ำประปา

การผลิตน้ำประปามีสิ่งที่ยึดเหนี่ยวจากการผลิตน้ำ คือ ตะกอน ซึ่งนับเป็นของเสียที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แหล่งกำเนิดของตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปามีอยู่ 2 แหล่ง คือ ตะกอนจากถังตกตะกอนในขบวนการทำให้ตกตะกอน และตะกอนที่เกิดในบ่อกรองในขั้นตอนการล้างทรายกรอง (มานิต ปานเอม, 2545)

1. ตะกอนที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอน (Coagulation basin) จะมีความเข้มข้นสูงอยู่ในช่วง 2% ถึง 7% (ค่าเฉลี่ยประมาณ 5%) เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลและขึ้นอยู่กับความถี่ในการระบายน้ำตะกอน ในระบบกวนเร็วกวนช้า ตะกอนที่เกิดจากสารส้มจะมีลักษณะเหนียวข้น การเอาน้ำออกทำได้ยาก ตะกอนจะมีความเข้มข้นที่ต่ำประมาณ 0.2% ถึง 2% และตะกอนที่เกิดจากเหล็กจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าตะกอนที่เกิดจากสารส้ม

2. ตะกอนจากการล้างทรายกรองในถังกรอง (Back wash) พบว่าตะกอนเหลวจากการล้างทรายกรองไม่เปลี่ยนแปลงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพมาก เนื่องจากมีการควบคุมความขุ่นของน้ำที่ออกมาจากถังตกตะกอนก่อนที่จะเข้าสู่ถังกรองค่อนข้างคงที่ ดังนั้นปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำจากตะกอนที่เกิดจากการล้างทรายกรองจะมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำระหว่าง 0.01% ถึง 0.1%

2.1.2 กำลั้งการผลิตน้ำประปาและปริมาณตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

การผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร จากน้ำดิบที่มีค่าความขุ่น 30 – 40 NTU จะมีปริมาณตะกอนดินเป็นของเสียเกิดขึ้นประมาณ 25 – 35 กรัม ซึ่งปัจจุบันน้ำดิบที่นำมาใช้มีความขุ่นมากขึ้น และความต้องการใช้น้ำของประชาชนก็มากขึ้น ทำให้ปริมาณตะกอนที่เป็นของเสียเหลือทิ้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ชัยพร เบ้าแก้ว, 2547) โดยโรงผลิตน้ำประปาที่สำคัญในกรุงเทพมหานคร ผลิตน้ำได้ต่อวันประมาณ 6.72 ล้านลูกบาศก์เมตร และมีตะกอนเกิดขึ้นประมาณ 235.2 ตันต่อวัน ดังตารางที่ 2-1

ประเภทของของเสียตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้จัดของเสียประเภทนี้ให้เป็นของเสียที่ไม่มีความอันตราย และมีรหัสของเสีย ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2- 1 ปริมาณการผลิตน้ำประปาและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น

โรงผลิตน้ำ	ปริมาณน้ำที่ผลิตต่อวัน (ลบ.ม.)	ปริมาณตะกอนต่อวัน (ตัน)
มหาสวัสดิ์	1.60	56,000
บางเขน	4.40	154,000
ธนบุรี	0.17	5,950
สามเสน	0.55	19,250
รวม	6.72	235.2

(ที่มา: การประปานครหลวง)

ตารางที่ 2- 2 ของเสียประเภทตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

รหัสของเสีย	ของเสียประเภทตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา
19 09 01	ของเสียในรูปของแข็งจากการกรอง และตะแกรงกรอง
19 09 02	กากตะกอนจากการทำน้ำให้ใส
19 09 03	กากตะกอนจากการกำจัดคาร์บอน
19 09 04	ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว
19 09 05	เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่อิ่มตัว หรือใช้งานแล้ว
19 09 06	กากตะกอนหรือน้ำล้างจากการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนประจุ

(ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

2.1.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอน

ตะกอนที่แยกจากน้ำดิบที่ได้จากการผลิตน้ำประปาเป็นตะกอนที่มาจากการตกตะกอนของสารแขวนลอยในน้ำ มีลักษณะเป็นตะกอนน้ำพา โดยทั่วไปตะกอนที่เกิดจากโรงผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่เป็นตะกอนสารส้ม (Alum sludge) ซึ่งเป็นตะกอนที่ยากแก่การกำจัด และทำให้แห้งยาก น้ำตะกอนมีค่าพีเอชระหว่าง 5.5-7.5 ประกอบด้วยสารอนินทรีย์ประเภทดินเหนียวและทราย นั่นคือตะกอนมีลักษณะเนื้อดินละเอียด กลมมน และมีการจัดขนาดอนุภาคค่อนข้างดี (เอิบ เขียวรัตน์, 2542) ขนาดเม็ดตะกอนขึ้นกับคุณภาพแหล่งน้ำดิบ โดยตะกอนจากการผลิตน้ำประปาแบ่งได้ 2 ประเภท

1. ตะกอนที่แขวนลอยในน้ำดิบ ส่วนใหญ่ตะกอนประเภทนี้จะอยู่ในรูปของดินเหนียว ทราโยโคลน หรือผสมสาหร่ายบางชนิด

2. ตะกอนที่เกิดจากสารเคมี ในกระบวนการผลิตน้ำประปามีการเติมสารเคมีหลายชนิดเพื่อปรับสภาพตะกอนและช่วยให้ตะกอนแยกออกจากน้ำได้ง่าย ดังนั้นตะกอนที่เกิดขึ้นมักเป็นตะกอนที่มีลักษณะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้

ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นตะกอนชนิดอนินทรีย์ที่ขอบน้ำ ที่ประกอบไปด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งเป็นตะกอนของอ็อกไซด์ในน้ำดิบ ได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก หรือเป็นผลมาจากการใช้สารตกตะกอนจำพวกอนินทรีย์ เช่น เกลือเฟอร์รัส หรือเฟอร์ริก สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเหล่านี้มีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอโดยเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะแข็งถึงแข็งมาก จับตัวกันแน่นมากขึ้น และเหนียวปานกลางถึงเหนียวมากเมื่อเปียก ตะกอนเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มาก เนื้อตะกอนแห้งเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง ซึ่งจำแนกอยู่ในชั้นดินละเอียด ความหนาแน่นรวมต่ำถึงปานกลาง แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่ที่พบเป็นแร่เคลอิไนต์ อิลไลต์ สเมกไทต์ ควอร์ตซ์ และแร็กิบบไซต์ ตามลำดับ (ปริศนา เสือแซมเสริม, 2545)

ตารางที่ 2- 3 ตะกอนดินลักษณะต่างๆ จากขั้นตอนหลังการรีดตะกอนของกระบวนการผลิตน้ำประปา

แหล่งที่เกิด	ลักษณะตะกอน	% ของของแข็งในตะกอนทั้งหมด	COD (มก./ล.)	สี
Coagulation-Flocculation	ตะกอนจากสารส้ม เหล็ก	0.5-2.0	30-5000	น้ำตาลเทา น้ำตาล
Chemical Precipitation	Softening sludges	2-15	ต่ำ	ขาว
ระบบล้างเครื่องกรอง	Backwash wastes	0.01-0.1	100	เทา ดำ

นอกจากนี้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปายังมีสมบัติอื่นๆ อีก เช่น ประกอบด้วยสารอนินทรีย์ มีการใช้สารส้มในการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาทำให้ตะกอนที่ได้มีปริมาณสารอะลูมิเนียมสูง ตะกอนมีลักษณะเป็นเนื้อดิน มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน มีความสามารถในการอุ้มน้ำและดูดซึมน้ำได้ดี และจากการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี และปริมาณสารอันตรายของตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ตามตารางที่ 2-4 และตารางที่ 2-5 พบว่าตะกอนมีปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณสูง และมีปริมาณสารอันตรายอยู่ในค่ามาตรฐาน จึงเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้ในการนำมาทำประโยชน์เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ตารางที่ 2- 4 องค์ประกอบของตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา	
องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	41.78 - 52.62
Al ₂ O ₃	24.40 - 37.45
Fe ₂ O ₃	6.11 - 7.38
MgO	0.52 - 1.16
CaO	0.44 - 1.23
Na ₂ O	0.14 - 0.24
K ₂ O	0.14 - 1.61
TiO ₂	0.74 - 0.81
P ₂ O ₅	0 - 0.12
MnO	0 - 0.10

(ที่มา: ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547)

ตารางที่ 2- 5 ปริมาณสารอันตรายของตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา						
ดัชนี	หน่วยน้ำหนัก เปียก	ผลการวิเคราะห์				ค่า มาตรฐาน
		2555	2557	2558	2559	
สารหนู (As)	mg/kg	1.68 ^a	6.94	10.6	12.2	≤500
แบเรียม (Ba)	mg/kg	20.4 ^c	20.2	18.6	25.6	≤10,000
แคดเมียม (Cd)	mg/kg	ND ^b	ND	ND	ND	≤100
โครเมียม (Cr)	mg/kg	2.82 ^b	ND	3.75	8.42	≤2,500
ทองแดง (Cu)	mg/kg	4.55 ^b	8.3	11.6	12.3	≤2,500
ตะกั่ว (Pb)	mg/kg	3.2 ^b	ND	3.48	9.07	≤1,000
ปรอท (Hg)	mg/kg	ND ^d	ND	0.388	0.0586	≤20
ซีลีเนียม (Se)	mg/kg	ND ^a	ND	ND	0.188	≤100
เงิน (Ag)	mg/kg	ND ^c	ND	ND	ND	≤500
สังกะสี (Zn)	mg/kg	12.8 ^b	8.5	18.8	26.5	≤5,000

หมายเหตุ ND หมายถึง No defined

a วิเคราะห์ด้วยวิธี Acid digestion and hydride generation AAS method (LOD = 0.1)

b วิเคราะห์ด้วยวิธี Acid digestion and direct air acetylene flame method (LOD = 0.6-1)

c วิเคราะห์ด้วยวิธี Acid digestion and inductively coupled plasma (ICP) (LOD = 0.5)

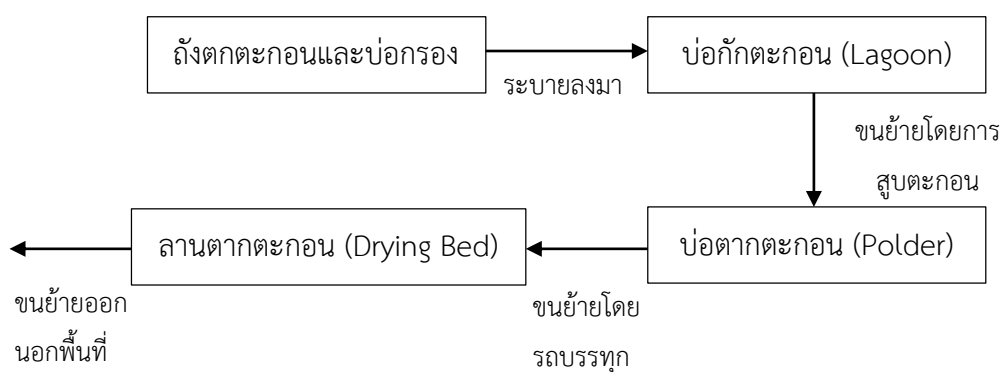
d วิเคราะห์ด้วยวิธี Acid digestion and cold vapour AAS method (LOD = 0.1)

(ที่มา: บริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด)

2.1.4 กระบวนการกำจัดตะกอน

ขั้นตอนการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา มีขั้นตอนดังภาพที่ 2-2 การกำจัดตะกอนเป็นการนำตะกอนไปใช้ประโยชน์หรือนำไปกำจัดอย่างถูกสุขลักษณะ ซึ่งตะกอนจะมีน้ำกับของแข็งผสมอยู่ด้วยกัน ส่วนมากจะมีน้ำมากกว่าของแข็งมากๆ ดังนั้นการกำจัดตะกอน คือ การแยกน้ำออกจากตะกอน เพื่อให้ได้ตะกอนแห้งที่สุดที่สามารถกระทำได้ ก่อนนำตะกอนไปทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. **การทำให้ตะกอนชื้น** เป็นการปล่อยให้ตะกอนตกตะกอนลงโดยน้ำหนัก และอัดแน่นเอง แล้วแยกน้ำออกเพื่อให้ได้ร้อยละของของแข็งในตะกอนสูงขึ้น
2. **การปรับสภาพตะกอน** เป็นการเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพตะกอน เช่น การเติมสารอินทรีย์พวกเกลือของอะลูมิเนียม เพื่อช่วยทำให้แยกน้ำออกจากตะกอนได้ง่ายขึ้น
3. **การแยกน้ำออกและการทำให้ตะกอนแห้ง** เป็นการลดปริมาณตะกอนที่จะต้องนำไปกำจัดในขั้นสุดท้ายโดยวิธีการแยกน้ำออกและทำให้ตะกอนแห้ง ตะกอนในบ่อกักตะกอนจะถูกสูบไปยังบ่อตากตะกอน ปล่อยให้ตะกอนตากลมและแสงอาทิตย์ ก่อนนำไปทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ
4. **การทิ้งกากตะกอน** การนำตะกอนไปทิ้งด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การนำไปส่งโรงบำบัดน้ำเสียเพื่อไปรวมกับตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย และวิธีที่นิยมมากที่สุดคือ นำตะกอนไปถมที่ นำตะกอนไปทิ้งที่พื้นดินทั่วไป (land spreading)



ภาพที่ 2- 2 ขั้นตอนการกำจัดตะกอน (จิตรกร วงศ์กรเชาวลิต, 2543)

จากปริมาณการเกิดตะกอนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ ทำให้มีผู้สนใจนำตะกอนกลับไปใช้ประโยชน์มากขึ้นเพื่อลดการนำของเสียเข้าสู่พื้นที่ฝังกลบ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียดังกล่าว เช่น

1. ประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากตะกอนมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับวัสดุปอซโซลานจึงคาดว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานได้ เช่น การนำตะกอนมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน การผลิตบล็อกประสาน การใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นต้น

2. นำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ใช้ในงานเซรามิก งานเครื่องปั้นดินเผา เนื่องจากตะกอนมีเหล็กออกไซด์ ทำให้เมื่อนำตะกอนไปเผาสามารถปรากฏสีแดงเข้มออกมาให้เห็นได้ จึงมีความเหมาะสมจะนำไปผลิตอิฐมอญ อิฐโปร่ง กระเบื้อง เป็นต้น

3. ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดการตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย มีการนำตะกอนมาใช้เป็นสารช่วยให้ตกตะกอน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติ บีโอติ และสารแขวนลอยได้ และยังสามารถใช้บำบัดน้ำมัน ไขมัน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

4. ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน นำตะกอนมาใช้ปรับปรุงดินที่มีสมบัติเป็นกรดเพื่อใช้ปลูกพืชได้ และปรับปรุงค่าพีเอช ลักษณะทางกายภาพในดินให้เหมาะสม ลดการชะละลายของแร่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช เป็นต้น

5. ใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากตะกอนมีองค์ประกอบที่สามารถดูดซับมลสารต่างๆได้ เช่น สามารถใช้บำบัดโลหะหนัก เช่น พรอท ตะกั่ว และทองแดงได้ และมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส กำจัดสีย้อมได้ เป็นต้น

2.2 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับในวัฏภาคน้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคในระดับครัวเรือนและชุมชน เนื่องจากสามารถกำจัดมลสารขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุลได้ เช่น สี กลิ่น และรสที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำดิบ โดยมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำมาจากแหล่งต่างๆ เช่น สารจากการชะละลายของแร่ธาตุในชั้นหินหรือในดิน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นต้น

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เป็นกระบวนการถ่ายเทมลสาร ซึ่งเรียกว่าตัวถูกดูดซับ หรือสารถูกดูดซับ (adsorbate) ออกจากวัฏภาคของเหลวเข้าสู่พื้นผิวของของแข็ง เรียกว่าตัวดูดซับ หรือสารดูดซับ (adsorbent) ทำให้ความเข้มข้นของมลสารในน้ำลดลง ซึ่งลักษณะของสารดูดซับที่ดีควรมีความสามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนัก หรือต่อหน่วยปริมาตรได้มาก หรือมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูง หรือเป็นวัสดุที่มีความพรุน เพื่อให้มีพื้นที่ผิวภายในสูง ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ตัวดูดซับกลุ่มคาร์บอน เช่น ถ่านกัมมันต์ ตัวดูดซับกลุ่มซิลิกา (อนินทรีย์) และตัวดูดซับกลุ่มเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งแต่ละประเภทมีความเหมาะสมต่อมลสารต่างกัน ดังนั้นการศึกษากระบวนการดูดซับจึงต้องเข้าใจองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ ตัวดูดซับ (Adsorbent) มลสารหรือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และตัวทำละลาย (Solvent) (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2538; ทวีศักดิ์ วังไพศาล, 2554)

2.2.1 ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับในวัฏภาคน้ำ

การดูดซับในวัฏภาคน้ำประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ตัวดูดซับ มลสารหรือตัวถูกดูดซับ และตัวทำละลาย โดยตัวดูดซับและมลสารที่เกิดปฏิสัมพันธ์กันมักเกิดขึ้นจากแรงต่างๆ ซึ่งถ้าแรงมีความแข็งแรงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมากขึ้น ในขณะที่ตัวถูกดูดซับและตัวทำละลายมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันรุนแรงเท่าใดย่อมส่งผลให้การดูดซับลดลง เนื่องจากความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวทำละลายและตัวดูดซับที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากปริมาณของตัวทำละลายมีมากกว่าปริมาณของตัวถูกละลาย ดังนั้นตัวทำละลายย่อมถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่าตัวถูกละลายและตัวถูกละลายจะถูกดูดซับได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับได้คายตัวทำละลายออกมาและรับเอามลสารเข้าไปไว้บนพื้นผิวตัวดูดซับ นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวยังมีปฏิสัมพันธ์อื่นๆ ที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์การดูดซับ

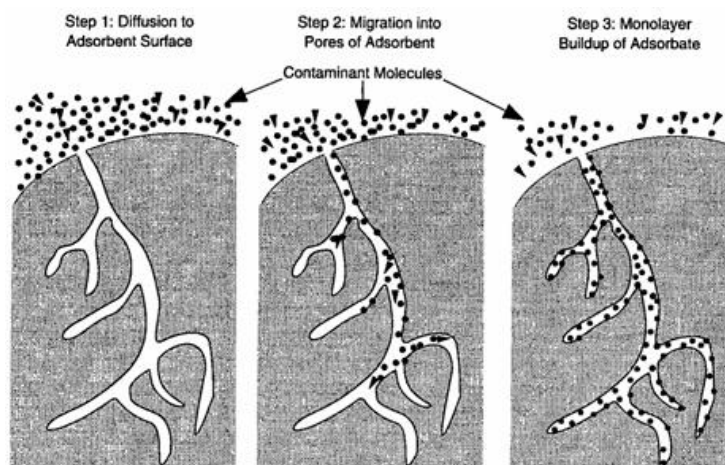
ได้ เช่น การรวมตัวของตัวถูกละลาย ทำให้โครงสร้างใหญ่ขึ้น ตัวถูกละลายรวมตัวกับตัวทำละลาย การดูดซับแบบ 2 ชั้น รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในระบบ เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.2.2 กลไกการดูดซับ กลไกการดูดซับของวัสดุดูดซับประกอบด้วยกลไกการดูดซับของวัสดุดูดซับที่มีรูพรุน และวัสดุดูดซับประเภทอะลูมินา ซิลิกา การดูดซับแบ่งได้ 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2-3 ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) หรือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) เนื่องจากมีของเหลวห่อหุ้มพื้นผิวตัวดูดซับ ทำให้การเข้าถึงตัวดูดซับของโมเลกุลตัวถูกละลายต้องแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวก่อนเข้าถึงผิวของตัวดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างและรูพรุนของตัวดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ผิวของตัวดูดซับถูกโมเลกุลของตัวถูกละลายมาดูดติด เป็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว ดังนั้นความต้านทานนี้จึงไม่ถูกนำมาสนใจ



ภาพที่ 2- 3 แสดงกลไกการดูดซับ

โดยอัตราการดูดซับขึ้นกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer) ถ้าอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลเร็วส่งผลให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น โดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดเนื่องจากมีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ โดยสามารถหากกลไกการดูดซับได้ด้วยสมการ Intraparticle diffusion แสดงดังสมการที่ 2.3

$$q_t = k_i t^{0.5} \quad (2.3)$$

โดย q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

k_i คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ผลสารเข้าสู่พรุนของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม.นาที่^{0.5})

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

2.2.3 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ (ธนพร คำขจร, 2552)

1. ระบบดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอ่อนข้างอ่อนระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของมลสารและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับตัวดูดซับมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวมลสารในตัวทำละลาย การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้นมาเกี่ยวข้อง และการดูดซับเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการดูดซับทางกายภาพ ได้แก่

1.1 แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) หรือแรงระหว่างโมเลกุล ประกอบด้วยแรงดึงดูด และแรงผลัก เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับและมลสารซึ่งเป็นแรงดึงดูดอ่อนๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล เนื่องจากทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นมา

1.2 แรงไอออน-คู่ขั้ว (Ion-dipole force) เป็นแรงไฟฟ้าสถิตย์ชนิดหนึ่ง เป็นแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกหรือลบกับโมเลกุลที่มีขั้ว โดยขนาดของแรงขึ้นกับประจุและขนาดของไอออน และค่าของโมเมนต์ขั้วคู่และขนาดของโมเลกุลด้วย

1.3 แรงไอออน-คู่ขั้วเหนี่ยวนำ (Ion-induced dipole force) เกิดระหว่างไอออนบวกหรือลบกับโมเลกุลชนิดไม่มีขั้วซึ่งแรงดึงดูดจากไอออนเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปข้างใดข้างหนึ่งทำให้เกิดสภาพคู่ขั้วเหนี่ยวนำขึ้น แรงประเภทนี้สามารถส่งเสริมความแข็งแรงของแรงไอออน-คู่ขั้ว โดยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของแรงดึงดูดด้วย

1.4 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) เป็นพันธะชนิด คู่ขั้ว-คู่ขั้ว (Dipole-dipole force) เกิดระหว่างไฮโดรเจนที่ถูกเหนี่ยวนำโดยอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) สูงกว่าของอะตอมไฮโดรเจน ทำให้เกิดพันธะที่มีสภาพขั้วสูงขึ้นมา

1.5 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การดูดซับเกิดจากการที่พื้นผิวปล่อยไอออนที่มีอยู่ออกไปและรับไอออนประจุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดหรือประจุสูงกว่าจากตัวทำละลายมาถือครอบครองแทน

1.6 แรงดึงดูดและแรงผลักทางประจุไฟฟ้า (Attractive- Repulsive electrostatic force) พื้นผิวตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันที่ให้หรือรับไฮโดรเจนไอออนได้ ขึ้นกับพีเอช ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับและมลสาร อาจเป็นแรงสนับสนุนหรือขัดขวางแรงดูดซับหลักได้ (ทวิศักดิ์ วังไพศาล, 2554)

2. ระบบดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorptions) เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่างมลสารกับพื้นผิวตัวดูดซับทำให้เกิดสารประกอบใหม่ที่พื้นผิว ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน หรือการสร้างพันธะเคมี โดยเกิดบนพื้นผิวที่มีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้น ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ให้ความร้อนของการดูดซับมีค่ามากกว่าระบบดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการสร้างพันธะเคมี จึงเกิดการดูดซับเพียงหนึ่งชั้นของสารถูกดูดซับ (monolayer adsorption) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้

ตารางที่ 2- 6 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (20-40 kJ/mol)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol)
สภาพจำเพาะ	ไม่จำเพาะ	มีความจำเพาะสูง
ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้น ไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับ
อุณหภูมิของการดูดซับ	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ	เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง
แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน
สภาพผันกลับได้	กระบวนการดูดซับผันกลับได้	กระบวนการดูดซับไม่ผันกลับ
อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

นอกจากการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก ได้แก่

การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุตรงข้ามกันหรืออาจเกิดจากการแทนที่ของประจุที่ผิวของตัวดูดซับกับไอออนของตัวถูกดูดซับ

การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ตัวดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

2.2.4 ปัจจัยทางกายภาพ-เคมีที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับมลสารในวัฏภาคน้ำ

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในโครงสร้างโมเลกุลของมลสารและพื้นผิวตัวดูดซับ เป็นสาเหตุให้เกิดการดูดซับ โดยประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ-เคมีของพื้นผิวตัวดูดซับ และลักษณะน้ำเสียหรือน้ำประปา ซึ่งอาจช่วยส่งเสริมการดูดซับหรืออาจขัดขวางการดูดซับได้เช่นกัน เนื่องจากน้ำหรือตัวทำละลายได้เข้าไปเติมเต็มในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้เกิดแรงดึงดูดพื้นฐานต่างๆ ขึ้น (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552; Cooney, 1999)

1. ความตึงผิว (surface tension) แรงตึงผิวของของเหลวเกิดขึ้นบริเวณผิวของของเหลวสัมผัสกับของเหลวอื่นหรือผิวของแข็ง โดยมีการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโมเลกุล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความตึงผิวของของเหลวจะมีค่าลดลง ในของไหลทุกชนิดมีสมบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล 2 ชนิด คือ แรงยึดติด (Cohesion forces) และ แรงเชื่อมแน่น (Adhesive force) การละลายของมลสารในน้ำอาจส่งผลต่อค่าความตึงผิวของวัฏภาคน้ำของเหลว ซึ่งโดยทั่วไปสารละลายที่มีค่าความตึงผิวต่ำมักมีศักยภาพในการรวมตัวของมลสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่ายกว่า

2. พื้นผิวและความพรุน (Surface and Porosity) การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น และพื้นที่ผิวยังขึ้นกับความพรุนของตัวดูดซับด้วย โดยเฉพาะพื้นที่ผิวภายในโครงสร้างรูพรุนมีผลต่อพื้นที่ผิวรวมของตัวดูดซับมากกว่าพื้นที่ผิวยานอก

3. หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ (Surface functional groups) มีผลต่อการคัดเลือกมลสารและอัตราการดูดซับ โดยลักษณะของตัวดูดซับส่วนหนึ่งเกิดจากชนิดและคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เช่น ลักษณะทางประจุไฟฟ้า หรือโมเลกุลเป็นพวกออกไซด์ เป็นต้น

4. อุณหภูมิ (Temperature) โดยส่วนใหญ่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับจะลดลง ทำให้การดูดซับลดลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้โมเลกุลของมลสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีพลังงานในการสั่นสูงขึ้น จึงทำให้มลสารมีแนวโน้มหลุดออกจากพื้นผิวตัวดูดซับเข้าสู่สารละลายได้มากขึ้น แต่ในทางปฏิบัติมักทำภายในอุณหภูมิตามสภาวะแวดล้อม ทำให้การออกแบบต้องคำนึงถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงปีของท้องถิ่นนั้นๆ ด้วย

5. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ ปฏิกริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลายขึ้นกับความสามารถในการละลาย ทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากมีการทำลายพันธะก่อนที่จะเกิดการดูดซับขึ้น ถ้ามลสารเป็นสารอินทรีย์จะขึ้นกับการแตกตัวเป็นประจุของสาร ซึ่งสารที่ไม่แตกตัวเป็นประจุนั้นจะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่แตกตัวเป็นประจุได้ดี สำหรับสารอินทรีย์การดูดซับขึ้นกับการละลายน้ำของมลสาร โดยมลสารที่ไม่ชอบน้ำจะถูกดูดซับได้ดีกว่ามลสารที่มีความชอบน้ำ โดยสมบัติความชอบน้ำของมลสารและหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพขั้วของมลสาร

6. ค่าพีเอชของตัวทำละลาย (pH) เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนถูกดูดซับบนพื้นผิวได้อย่างแข็งแรง ส่งผลต่อการละลายของสารต่างๆ และการแตกตัวเป็นไอออน ทำให้ดูดซับได้ยากขึ้น และทำให้มลสารที่ถูกดูดซับไปแล้วหลุดออกมา เนื่องจากมีประจุชนิดเดียวกับประจุในสารละลายทำให้เกิดแรงผลักรั้งที่สูงกว่าแรงดึงดูด และทำให้ที่สภาวะสมดุลการดูดซับ ความหนาแน่นของการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับลดลง

7. การมีอยู่ของเกลือ มลสารสามารถถูกดูดซับติดกับประจุไอออนตรงข้ามของเกลืออนินทรีย์ที่ละลายอยู่ได้ ทำให้ความเป็นประจุของมลสารลดลง ทำให้การผลักรั้งของมลสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับลดลง จึงเกิดการสะสมที่พื้นผิวตัวดูดซับได้มากขึ้น ดังนั้นถ้าแรงหลักในการดูดซับระหว่างมลสารและตัวดูดซับเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักรั้ง ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นกับปริมาณเกลือในน้ำ

8. ความหลากหลายของมลสาร ทำให้เกิดการแย่งชิงพื้นที่บนตัวดูดซับมักทำให้การดูดซับมลสารเดิมลดลง แต่บางพื้นที่ดูดซับมลสารได้บางชนิดจึงไม่เกิดการแย่งชิงพื้นที่

9. ความบั่นป่วน ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ โดยทำให้น้ำและตัวดูดซับผสมเข้ากันได้ และส่งผลต่ออัตราการแพร่ผ่านเข้าสู่ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับ ถ้าใช้ความบั่นป่วนต่ำ ฟิล์มจะมีความหนามากเนื่องจากไม่ถูกรบกวนจากแรงเฉือน ทำให้มวลสารเคลื่อนเข้าหาตัวดูดซับยากขึ้น อัตราการดูดซับจึงขึ้นกับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

2.2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับในวัฏภาคน้ำ

จลนพลศาสตร์การดูดซับในวัฏภาคน้ำเป็นข้อมูลที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับมวลสารของตัวดูดซับกับเวลา โดยส่วนใหญ่อัตราการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการดูดซับ จากนั้นจะลดลงจนเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ นอกจากนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับบนตัวดูดซับต่อเวลายังนำมาใช้ในการระบุปัจจัยที่เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับด้วยเช่นกัน (Banat และคณะ, 2003; Sun และ Yang, 2003) ปัจจุบันรูปแบบปฏิบัติการการดูดซับใช้เพื่ออธิบายถึงกระบวนการดูดซับ โดยจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมใช้อธิบาย ได้แก่ จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน และจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน

1. จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic) Lagergren (1898) เสนอสมการเพื่อใช้อธิบายกระบวนการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดออกซาลิกและกรดมาโลนิก ด้วยถ่าน ซึ่งมีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.4 โดยการดูดซับมวลสารบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับทางเคมี

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (2.4)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการที่ 2.4 ในช่วง $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q = 0$ ถึง $q = q_t$ และจัดรูปจะได้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 2.5

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (2.5)$$

โดย q_t คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

q_e คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน

t คือ ระยะเวลาของการดูดซับ (นาที)

2. จลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second order kinetic) Ho และ Mckay (1998) อธิบายการดูดซับ divalent metal ion ลงบนถ่านหินพรุ ซึ่งอาจเป็นการดูดซับลำดับที่สอง และขั้นตอนกำหนดอัตราของปฏิกิริยาอาจเป็นการดูดซับทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับแรงวาเลนซ์โดยการใช้ อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน โดยอัตราการดูดซับอธิบายได้ตามสมการที่ 2.6

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (2.6)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการที่ 2.6 ในช่วง $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q = 0$ ถึง $q = q_t$ และจัดรูปจะได้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 2.7

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.7)$$

โดย k_2 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน (กรัม/มิลลิกรัม.นาทึ)

3. จลนพลศาสตร์การดูดซับ Ritchie-second order Ritchie (1977) ได้อธิบายการดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับในระบบก๊าซได้ตั้งสมการที่ 2.8 (Yuh-Shan Ho, 1998)

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_r q_e t} + \frac{1}{q_e} \quad (2.8)$$

โดย k_r คือ ค่าคงที่แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Ritchie-second order (1/นาทึ)

2.2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (Isotherm adsorption) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ และความเข้มข้นสุดท้ายของมลสารในสารละลายที่สภาวะสมดุล อนุกรมสมการที่ค่าหนึ่ง พบว่าความสัมพันธ์เป็นไปในรูปแบบฟังก์ชัน ซึ่งเรียกว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับใช้สมการทางคณิตศาสตร์อธิบายสมดุลการดูดซับ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ เช่น ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรูนดลิช และไอโซเทอมการดูดซับของเทมกิน

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Isotherm) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของมลสารในสารละลายกับปริมาณของมลสารบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลในลักษณะเส้นตรงโดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.9

$$q_e = K_p C_e \quad (2.9)$$

โดย q_e คือ ปริมาณมลสารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K_p คือ ค่าคงที่สมดุลแบบเส้นตรง (ลิตร/กรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของมลสารในสารละลายในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

2. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ อธิบายการดูดซับไว้โดยกำหนดนิยามไว้ 4 ข้อ (Chung และคณะ, 2015) ได้แก่

- ก. พลังงานในการดูดซับเท่ากันทุกบริเวณที่มีการดูดซับ
- ข. การดูดซับเกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวเท่านั้น (Adsorption Site)
- ค. พื้นผิวที่ตัวดูดซับสามารถเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ได้กับมลสารเป้าหมายเท่านั้น
- ง. ไม่มีแรงใดๆ กระทำกันระหว่างตัวมลสารด้วยกันเอง

จากข้อกำหนดดังกล่าว ตำแหน่งการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะดูดซับมลสารได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และมีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะจำกัดต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยมลสารทั้งหมดก็จะสิ้นความสามารถในการดูดซับ โดยอัตราการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของมลสาร (C_e) และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวตัวดูดซับที่ว่างอยู่ โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.10 และจัดรูปเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.11

$$q_e = \frac{b q_m C_e}{1 + b C_e} \quad (2.10)$$

โดย q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{b q_m C_e} \quad (2.11)$$

3. ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Frundlich Isotherm) ใช้อธิบายการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมเพิ่มขึ้นในรูปลอการิทึมหรือเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.12

$$q = KC_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.12)$$

โดย K และ n คือ ค่าคงที่ โดย $1/n$ เป็นตัวแปรไร้หน่วย และหน่วยของค่า K แปรเปลี่ยนไปตามค่า q และ C_e สามารถนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.13

$$\log q = \log K + \left(\frac{1}{n}\right)\log C_e \quad (2.13)$$

ทั้งนี้สมการแบบฟรอนด์ลิชมีช่วงความเข้มข้นสมดุลที่เข้ากับสมการค่อนข้างแคบ เมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงหรือต่ำมากๆ ค่าจากการทดลองมีแนวโน้มไม่สอดคล้องกับสมการแบบฟรอนด์ลิช

4. ไอโซเทอมของเทมกิน (Temkin Isotherm) ไอโซเทอมของเทมกินจะแตกต่างจากไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช โดยไอโซเทอมของเทมกินสามารถนำไปใช้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอมนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ สมการของเทมกิน แสดงดังสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (2.14)$$

$$B = \frac{RT}{b} \quad (2.15)$$

โดย B คือ ค่าคงที่ของเทมกิน ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (จูล/โมล)

A คือ ค่าคงที่สมดุลการยึดเกาะ (ลิตร/กรัม) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (Maximum binding energy)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูล/โมล.เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

2.3 การกระตุ้นตัวดูดซับ

การกระตุ้นตัวดูดซับเป็นการทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยวัตถุประสงค์ของการกระตุ้นตัวดูดซับ (ธวัชชัย สิงหศิริ, 2548) ได้แก่

1. การกระตุ้นทำให้พื้นที่ผิวที่ว่องไวเพิ่มขึ้น (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
2. การกระตุ้นเป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นที่ผิวที่มีอยู่แล้ว ทำให้อะตอมของตัวดูดซับมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยมีการจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
3. การกระตุ้นเป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active centers)

การกระตุ้นตัวดูดซับแบ่งตามกลไกวิธีกระตุ้น สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ

2.3.1 การกระตุ้นทางกายภาพ

การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการทำให้ผิวตัวดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ มักใช้ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ เป็นต้น ไปทำการออกซิไดซ์สารบางตัวในโครงสร้างของตัวดูดซับ ทำให้โครงสร้างเกิดการเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น โดยข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ เมื่อกระตุ้นตัวดูดซับเสร็จสามารถนำตัวดูดซับไปใช้งานได้เลย ไม่มีปัญหาในเรื่องการล้างสารตกค้างที่อาจเป็นอันตราย ข้อเสียของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูง และรูพรุนที่ได้อาจจะเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี

ตารางที่ 2- 7 การสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของโครงสร้างทางเคมีของสารที่อยู่ในดิน

อุณหภูมิที่สลายตัว (°C)	ปฏิกิริยาการสลายตัว
250 - 920	$S + O_2 \rightarrow SO_2$
300 - 450	$FeS_2 + O_2 \rightarrow FeS + SO_2$
ตั้งแต่ 350	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
400 - 900	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$
500 - 800	$4FeS + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2S_3 + 4SO_2$
560 - 775	$Fe_2(SO_4)_2 \rightarrow Fe_2S_3 + 3SO_3$
600- 1,050	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

(ที่มา: Bohn และคณะ, 1985)

2.3.2 การกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้นตัวดูดซับ โดยการผสม คลุกเคล้า และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจะนำตัวดูดซับไปแช่หรือผสมกับสารเคมี หลังจากแช่แล้วต้องล้างสารเคมีออกจากตัวดูดซับก่อนนำตัวดูดซับไปใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างได้ สารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ สารประกอบของโพแทสเซียม หรือโซเดียม เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น แคลเซียมคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น การกระตุ้นตัวดูดซับด้วยสารเคมีที่เป็นกรดจะทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุพื้นผิวเป็นบวกมากขึ้น และในทางตรงกันข้ามการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยสารเคมีที่เป็นด่างทำให้เกิดประจุลบบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมี คือ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า ประหยัดพลังงานมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และสารเคมีสามารถแทรกซึมลงไปยังพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมาก ส่วนข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี คือ ต้องล้างสารเคมีออกจากตัวดูดซับก่อนใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างได้ รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ ถ้าใช้สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นสารกัดกร่อน

2.4 ฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์ (Fluoride) เป็นเกลือของฟลูออรีน โดยฟลูออรีน (F_2) มีสีเหลืองซีด มีสถานะเป็นก๊าซ มีความไวต่อปฏิกิริยา เป็นธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) สูงที่สุด ทำให้ในธรรมชาติไม่พบฟลูออรีนในรูปธาตุอิสระ มักพบฟลูออรีนอยู่ในรูปของฟลูออไรด์ซึ่งเป็นไอออนอิสระ (F^-) ซึ่งมีขนาดประจุใกล้เคียงกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จึงมักแทนที่กันได้ดีในแร่ธาตุ หรืออยู่รวมกับสารประกอบหรือแร่ธาตุอื่นๆ เป็นสารประกอบฟลูออไรด์ ยกเว้น ฮีเลียม นีออน และอาร์กอน โดยที่ไอออนบวกหลายประจุ เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก ซิลิกอน และแมงกานีส เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับฟลูออไรด์ไอออนได้ดี

2.4.1 แหล่งที่มาของฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเกิดเนื่องจากกระบวนการทางธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น (Chen และคณะ, 2011)

1. ฟลูออไรด์จากธรรมชาติ พบได้ทั่วไปทั้งในทะเล น้ำใต้ดิน ในสินแร่ต่างๆ รวมทั้งฝุ่นที่อยู่ใกล้แหล่งแร่ โดยการปนเปื้อนส่วนใหญ่จะพบในแหล่งน้ำ ซึ่งปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำขึ้นอยู่กับพื้นที่ ประเภทแหล่งน้ำ ปริมาณน้ำฝน และปริมาณน้ำที่ระเหย โดยทั่วไปน้ำทะเลมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ประมาณ 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร (Gupta และคณะ, 1978) น้ำผิวดินมีความเข้มข้นฟลูออไรด์น้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำใต้ดินมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูง ตั้งแต่ 1–35 มิลลิกรัมต่อลิตร (Susheela และคณะ, 1999) ในประเทศไทยพบความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงถึง 1–20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินสูง เนื่องจากน้ำใต้ดินอาจเคลื่อนผ่านสินแร่ที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดการชะละลาย กัดกร่อน การสลายตัวของฟลูออไรด์ออกมาอยู่ในน้ำ (Sujana และคณะ, 1998; Vinati และคณะ, 2015)

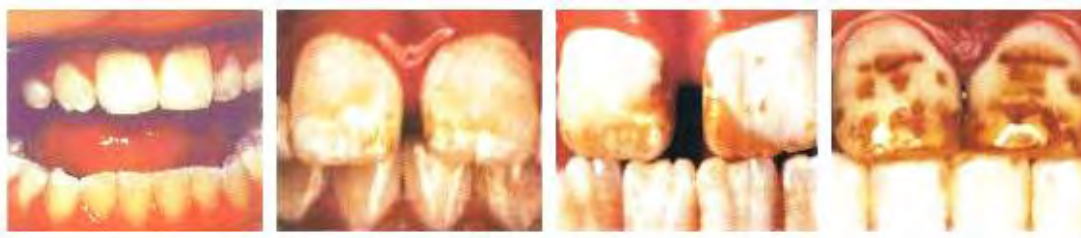
สินแร่ที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดิน เช่น แร่ฟลูออไรต์ แร่ฟลูออไรท์ (CaF_2) แร่โคโลไรท์ (Na_3AlF_6) แร่ฟลูออไรท์ (CaF_2) แร่โคโลไรท์ (Na_3AlF_6) หรือแร่ฟลูออไรด์อื่นๆ ฟลูออไรด์ในน้ำจะอยู่ในรูปของ NaF , CaF_2 , H_2F_2 และ F_2 ซึ่งปกติฟลูออไรด์จะละลายในน้ำมากที่สุดประมาณ 14 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากกรณีหน้าแล้งที่น้ำใต้ดินระเหยออกไป ทำให้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเพิ่มสูงขึ้นได้ อาจพบฟลูออไรด์มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกรัมได้ (รุจิรา ไทยเอียด, 2548)

2. ฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรม แหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์อาจมาจากน้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรมที่มีการใช้ฟลูออไรด์ เช่น ในการกัดผิวในอุตสาหกรรมผลิตแก้วและควอร์ตสำหรับ อุปกรณ์สื่อสาร มีการใช้กรดไฮโดรฟลูออริก แอมโมเนียมโบรไมด์ ฟลูออไรด์ การกำจัดความสกปรกต่างๆ ออกจากผิวโลหะ มีการใช้กรดผสมของไฮโดรฟลูออริกกับกรดอื่นๆ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีการใช้ ฟลูออไรด์ในน้ำยาชุบโลหะ เช่น กรดไฮโดรฟลูออริก โซเดียมฟลูออไรด์ โพแทสเซียมฟลูออไรด์ กรด ฟลูออโรซิลิสิก ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเซรามิกส์ อุตสาหกรรมการสกัดเบริลเลียม โรงหลอมอะลูมิเนียม อุตสาหกรรมการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมสี เป็นต้น (สุรศักดิ์ มานะรัตนสุวรรณ, 2541; Vinati และคณะ, 2015)

2.4.2 ผลกระทบของฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

มนุษย์ได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายทางน้ำดื่มเป็นส่วนใหญ่ (Zohouri and Rugg-Gunn, 1999) ร่างกายสามารถรับฟลูออไรด์ได้จากแหล่งอื่นๆ เช่น ยาสีฟัน (500-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ใบชา (มากกว่า 371 มิลลิกรัมต่อกรัม) (Lung และคณะ, 2003; Fawell และคณะ, 2006) และเครื่องดื่มต่างๆ เช่น เบียร์ มีฟลูออไรด์ 0.23-1.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟลูออไรด์ที่ร่างกายได้รับเข้าไปจะไปสะสม อยู่ในกระดูกและฟัน บางส่วนถูกขับออกทางปัสสาวะและอุจจาระในรูปแบบแคลเซียมฟลูออไรด์ (Kao และคณะ, 2004) ซึ่งฟลูออไรด์มีความจำเป็นต่อมนุษย์ ฟลูออไรด์ในปริมาณต่ำเป็นประโยชน์ต่อ สุขภาพช่วยให้กระดูกแข็งแรงและป้องกันฟันผุ และจำเป็นต่อระบบเมตาบอลิซึมในร่างกาย (Shan และ Guo, 2013) ในทางการแพทย์ฟลูออไรด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นยารักษาโรค วัณโรค มะเร็ง และใช้เป็นองค์ประกอบของคอร์ติโคสเตอรอยด์บางชนิด (ฐิติพงศ์ เอี่ยมวราพันธ์, 2544) แต่หาก ร่างกายได้รับฟลูออไรด์มากเกินไปจะเป็นโทษต่อร่างกาย ได้แก่

1. ฟลูออไรด์เป็นพิษต่อฟัน ฟลูออไรด์จะไปรบกวนกระบวนการสร้างแร่ธาตุที่เคลือบฟัน โดยเฉพาะในเด็กตั้งแต่ 6 เดือนถึง 5 ปี ที่อยู่ในช่วงวัยที่ร่างกายกำลังสร้างฟันอยู่ ทำให้เกิดความ ผิดปกติต่อผิวเคลือบฟันที่เรียกว่า ฟันตกกระ (Dental fluorosis) จะเกิดรอยต่างขาวบนผิวฟัน อาจ รุนแรงจนผิวฟันเป็นสีน้ำตาล ทำให้เคลือบฟันมีสีขาวขุ่นบางส่วนหรือทั้งซี่ ขึ้นอยู่กับปริมาณฟลูออไรด์ ที่ได้รับ โดยฟันตกกระเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นถาวร ไม่สามารถรักษาฟันให้หายเป็นปกติได้



ภาพที่ 2- 4 อาการของโรคฟันตกกระ (Dental fluorosis) (Anna Selby, 2002)

2. ฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูก ฟลูออไรด์ไปรบกวนเซลล์ที่ทำหน้าที่ในการสร้าง การซ่อมแซมโครงสร้างของกระดูก ทำให้เกิดความผิดปกติในการสะสมและการจับของแคลเซียมในกระดูก เช่น ทำให้เกิดการสะสมแคลเซียมบริเวณข้อต่อกระดูกแขนขา และรอยต่อระหว่างกระดูกสันหลัง ทำให้เกิดโรคข้อต่ออักเสบ ทำให้โครงสร้างกระดูกผิดปกติ เช่น กระดูกสันหลังโค้งงอ และขาโก่ง ทำให้การเคลื่อนไหวร่างกายผิดปกติ อาจรุนแรงถึงขั้นพิการ และส่งผลให้เกิดโรคกระดูกพรุนและมะเร็งกระดูกได้ (Susheela และคณะ, 1999; ฐิติพงศ์ เอี่ยมวราพันธุ์, 2544)

3. ฟลูออไรด์เป็นพิษต่อระบบต่างๆ ในระยะเริ่มแรกจะมีอาการปวดหัว ปวดท้อง กล้ามเนื้ออ่อนแอ (Susheela และคณะ, 1999) ต่อมาฟลูออไรด์จะไปรบกวนระบบการทำงานของต่อมไร้ท่อต่อมไทรอยด์ ต่อมพาราไทรอยด์ รวมถึงการทำงานของตับและไต และอวัยวะอื่นๆ และอาจทำให้ไอคิวต่ำลง (Shan และ Guo, 2013; Chen และคณะ, 2011)

4. ฟลูออไรด์ส่งผลกระทบต่อระบบประสาท แคลเซียมที่ถูกสะสมบริเวณกระดูกสันหลัง ทำให้เส้นประสาทไขสันหลังถูกกดทับ ส่งผลให้เป็นอัมพาต และอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ (Susheela และคณะ, 1999; ฐิติพงศ์ เอี่ยมวราพันธุ์, 2544)

นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อสัตว์และพืชด้วย หากสัตว์ได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากเกินไป จะมีผลต่อการพัฒนาระบบฟันน้ำนม ฟันแท้ขึ้นผิดปกติ น้ำหนักลด ส่งผลต่อการผลิตน้ำนม การเจริญเติบโต เกิดผลเสียต่อการปศุสัตว์ได้ ส่วนพืชถ้าได้รับปริมาณมากไปจะทำให้เกิดรอยด่างที่ใบ อีกทั้งยังรบกวนการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมในพืชได้

2.4.3 การปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำใต้ดินของประเทศไทย

ปริมาณฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบาดาลมักไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลามากนัก ดังนั้นข้อมูลฟลูออไรด์ในน้ำแม้จัดเก็บมาหลายปีก็ยังใช้บ่งชี้ความเสี่ยงต่อสุขภาพได้ในระดับหนึ่ง จากข้อมูลของกรมอนามัยที่สำรวจบ่อบาดาล 61,343 บ่อ ทั่วประเทศไทย พบว่ามีบ่อที่มีปริมาณฟลูออไรด์ปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานสำหรับการบริโภคกระจายอยู่ทั่วประเทศ และจังหวัดที่มีฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำเกินค่ามาตรฐานมากกว่าร้อยละ 25 เช่น จังหวัดแม่ฮ่องสอน ประจวบคีรีขันธ์ กาญจนบุรี เพชรบุรี อุทัยธานี ตาก ลำพูน ชลบุรี นครปฐม ราชบุรี ภูเก็ต เป็นต้น ตัวอย่างปริมาณฟลูออไรด์ที่พบในประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2- 8 ตัวอย่างปริมาณฟลูออไรด์ในประเทศไทย

พื้นที่		ปริมาณฟลูออไรด์ (มก./ล)	
จังหวัด	อำเภอ/ตำบล	ต่ำสุด	สูงสุด
ราชบุรี	อ.บ้านคา	0.07	13.7
	อ.สวนผึ้ง	<0.1	16.22
	อ.ปากท่อ	0.29	3.11
	อ.ดำเนินสะดวก	0.15	2.88
นครปฐม	อ.กำแพงแสน	0.05	3.62
	อ.บางเลน	0.1	10.00
	อ.ดอนตูม	0.30	4.08
กาญจนบุรี	ต.บ่อพลอย	-	16.4
เชียงใหม่	ต.ปูกา และ ต.ออนใต้	-	1.50

2.4.4 การควบคุมฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์ควรมีอยู่ในน้ำประปา แต่ไม่ควรเกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าฟลูออไรด์มีค่ามากเกินไป มาตรฐานของน้ำดื่ม ต้องกำจัดฟลูออไรด์ออกก่อนนำน้ำมาอุปโภคบริโภค ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น

1. เติมสารส้ม เกลือของอะลูมิเนียม แล้วกรองตะกอนสารส้มออก
2. ใช้ Activated carbon ในการแยกสารฟลูออไรด์ออกจากน้ำประปา
3. ใช้ Fluoride exchangers โดยใช้ Bone charcoal ใส่ในถังปฏิกริยา
4. การดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน (adsorption and ion exchange) ใช้บำบัดฟลูออไรด์จากน้ำธรรมชาติซึ่งมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ค่อนข้างต่ำ
5. การตกตะกอน (Precipitation) ใช้บำบัดน้ำเสียหรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานซัลเฟอร์ โรงงานผลิตฟอสเฟต เป็นต้น
6. การใช้แผ่นเยื่อสังเคราะห์ (membrane technique)

2.5 ไนเตรท

สารประกอบไนโตรเจนในน้ำจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ไนเตรท (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) และแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) อันเป็นการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจากอินทรีย์สารเป็นอนินทรีย์สาร เมื่อเวลาผ่านไปไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์จะลดลง พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท โดยไนเตรทเป็นเกลือของกรดไนตริกซึ่งเป็นกรดแก่ ส่วนไนไตรท์เป็นเกลือของกรดไนตริกซึ่งเป็นกรดอ่อน สารไนไตรท์ถูกออกซิไดซ์เป็นสารไนเตรทได้ง่าย ดังนั้นในสิ่งแวดล้อมมักพบไนเตรทมากกว่าไนไตรท์

ไนเตรท (Nitrate) เป็นมลพิษที่เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินในหลายประเทศ เนื่องจากไนเตรทมีความเป็นพิษและแพร่กระจายออกเป็นบริเวณกว้าง โดยแหล่งกำเนิดของไนเตรทมีทั้งมาจากธรรมชาติและกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การใช้ปุ๋ยเคมี การทำปุ๋ยคอก น้ำทิ้งชุมชน น้ำทิ้งอุตสาหกรรม ขยะมูลฝอยและเศษอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการเกษตร ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยและสารเคมีในปริมาณมาก และสารไนเตรทเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ไนเตรทเกิดการปนเปื้อน

ออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยพบว่าแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมมีคุณภาพเสื่อมโทรมลงเนื่องจากการปนเปื้อนด้วยปุ๋ยและสารเคมีเกษตร (Scanlon และคณะ, 2007) และทั่วโลกมีการใช้ปุ๋ยเพิ่มมากขึ้นกว่า 700% ในช่วงเวลา 40 ปีที่ผ่านมา โดยประเทศไทยพบว่ามีอัตราการใช้ปุ๋ยเฉลี่ยเท่ากับ 101 กิโลกรัมต่อเฮกเตอร์ (FAQ) และมีเพียง 5% ของปุ๋ยที่ใส่ทั้งหมดเท่านั้นที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ที่เหลือสูญหายไปเนื่องจากการชะล้างของดิน น้ำ อากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลง (Phupaibul และคณะ, 2004) โดยไนโตรเจนในดินจะเป็นตัวควบคุมปริมาณไนเตรทในน้ำใต้ดิน ไนเตรทจะกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และในชั้นน้ำบาดาล ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพน้ำใต้ดินที่จะนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค จึงต้องมีการกำหนดปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดของไนเตรทในน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคไว้ เพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้น

2.5.1 แหล่งที่มาของไนเตรท

1. แหล่งธรรมชาติ ไนเตรทในดิน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีนในพืช สัตว์และของเสียจากสัตว์ โดยจุลินทรีย์ แอมโมเนียมไอออนจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทและไนเตรท การเกิดไนเตรทและไนเตรทตามธรรมชาติ จึงเป็นผลจากรวัฏจักรของไนโตรเจน แต่โดยปกติจะพบเห็นไนเตรทในปริมาณต่ำมาก

2 แหล่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์

2.1 ปุ๋ย เป็นแหล่งใหญ่ของไนเตรทในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สารประกอบไนเตรทของแอมโมเนียม แคลเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม รวมทั้งยูเรีย เนื่องจากพืชไม่สามารถใช้ไนโตรเจนในดินได้อย่างสมบูรณ์ จึงมีบางส่วนที่สะสมในดินและไหลลงสู่แหล่งน้ำ และพบว่าน้ำมีการปนเปื้อนไนโตรเจนมาจากพื้นที่ใช้ปุ๋ยมากกว่าพื้นที่ที่ไม่ได้ใช้ปุ๋ยในบริเวณเดียวกันถึง 3-10 เท่า

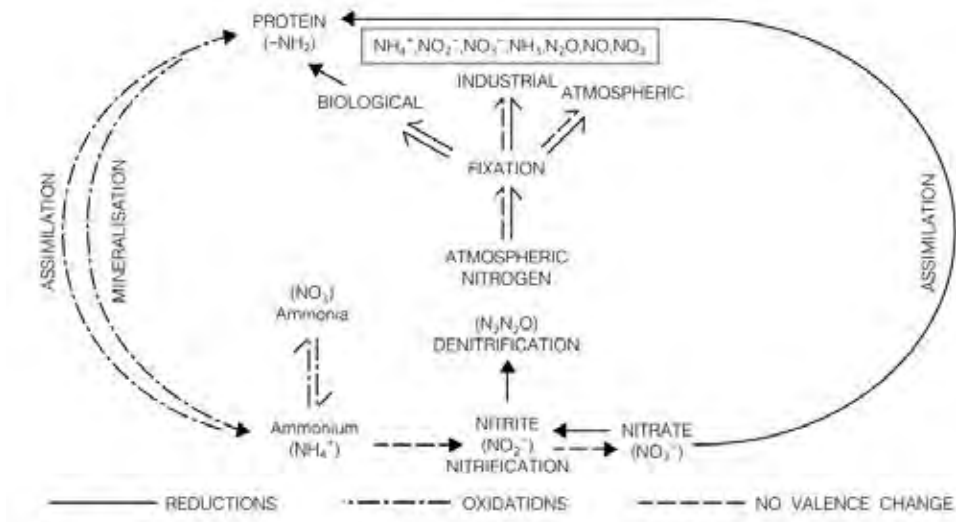
2.2 ของเสียจากสัตว์ การทำปศุสัตว์ก่อให้เกิดของเสียจากสัตว์ที่เป็นสารประเภทไนโตรเจน ซึ่งเปลี่ยนเป็นไนเตรทได้ ทำให้เกิดการสะสมไนเตรทในน้ำใต้ดินสูงกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 การใช้เป็นสารปรุงแต่งอาหาร ใช้ไนเตรทในการผลิตและการรักษาคุณภาพเนื้อสัตว์ประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพื่อป้องกันแบคทีเรียซึ่งจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์

2.4 การใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น แอมโมเนียมไนเตรท ใช้ผลิตวัตถุระเบิดและดินปืน ใช้ผลิตโซเดียมไนไตรต์ โพแทสเซียมไนเตรท ใช้เป็นปุ๋ย ใช้ถนอมอาหาร ใช้ผลิตโลหะ แก้ว เทียน ไม้ขีด

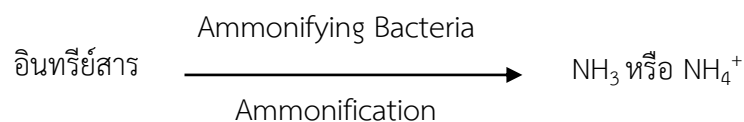
แคลเซียมไนเตรท ใช้เป็นปุ๋ย ใช้ผลิตก๊าซไนตรัส ไนเตรทของเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โครเมียม ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า ไนเตรทของปรอท เงิน ใช้ในอุตสาหกรรมยารักษาโรค เป็นต้น

2.5.1.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของไนเตรทในสิ่งแวดล้อม

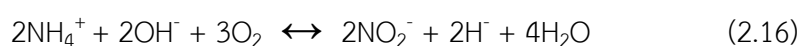


ภาพที่ 2- 5 วัฏจักรของไนโตรเจน (Soderlund และ Svensson, 1976)

การแลกเปลี่ยนไนโตรเจนระหว่างบรรยากาศและพื้นดินเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า วัฏจักรของไนโตรเจน (nitrogen cycle) สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำธาตุไนโตรเจนมาใช้ได้โดยตรง จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อไนโตรเจนในบรรยากาศถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบ โดยไนโตรเจนในบรรยากาศจะถูกจุลินทรีย์ที่อยู่ในพืชและในดินเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบ เช่น ไนไตรท์ แอมโมเนียไนไตรท์ ซึ่งจะได้กรดอะมิโนก่อนถูกเปลี่ยนเป็นรูปแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) โดยกระบวนการสร้างแอมโมเนีย (ammonification)



จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการสร้างไนไตรท์ และไนเตรท โดยกระบวนการ Biological Oxidation หรือ Nitrification ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังสมการที่ 2.16 และ 2.17





พืชใช้ในตรรกะได้บางส่วน ทำให้บางส่วนไหลลงสู่แหล่งน้ำ และบางส่วนเกิดกระบวนการสร้างไนโตรเจน (Denitrification) เป็นการสลายไนเตรทเป็นไนโตรเจน และไนโตรเจนออกไซด์แล้วเข้าสู่บรรยากาศ ดินและน้ำ พืชดูดซึมนไนเตรทไปบางส่วนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ชีวโมเลกุล (Biological Molecules) ของเสียจากพืชและสัตว์จะถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนเข้าสู่ดิน บางส่วนจะหมุนเวียนกลับไปสู่บรรยากาศตามวัฏจักรของไนโตรเจน

2.5.1.2 การเคลื่อนย้ายไนเตรทลงสู่แหล่งน้ำ

1. **ดูดซับจากอากาศโดยตรง** ไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบหลักในอากาศมีมากถึง 78% ของอากาศทั้งหมด อีกทั้งแอมโมเนียเมื่อระเหยกลายเป็นไอออกจากผิวหน้าของกองอาหารสัตว์และสิ่งปฏิกูลของสัตว์จะถูกดูดซับไปจากอากาศ โดยผิวน้ำในบริเวณใกล้เคียง (Viets และ Hageman, 1971)

2. **น้ำไหลบ่าหน้าดินและน้ำใต้ดิน** ธาตุอาหารของพืชต่างๆ ปะปนอยู่ในน้ำที่ไหลบ่าหน้าดินในรูปของสารละลาย หรือดูดซับมากับตะกอน (Wendt และ Corey, 1980) ซึ่งธาตุที่ละลายน้ำได้ดีมีแนวโน้มถูกชะล้างไปตามน้ำและซึบลงสู่ใต้ดิน ไนเตรทจะถูกชะล้างได้มากและซึบลงดินได้ดี และถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของดิน และถ้ามีอากาศเพียงพอแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไนเตรทได้ง่ายและเร็วมาก จึงถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำในรูปไนเตรทได้อีก ซึ่งมีผลต่อความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำใต้ดิน

3. **ปะปนมากับหยาดน้ำฟ้า** ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมและไนเตรทไอออนจะปะปนมากับหยาดน้ำฟ้าและลงสู่แหล่งน้ำได้มากกว่าปริมาณที่มาจากน้ำไหลบ่าหน้าดิน

2.5.2. ผลกระทบของไนเตรทที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

ร่างกายสามารถดูดซึมนไนเตรทจากระบบทางเดินอาหารอย่างรวดเร็ว พิษของไนเตรททำให้เกิดโรค “Blue-baby syndrome” เด็กทารกที่ดื่มน้ำที่ปนเปื้อนไนเตรทจะมีความเสี่ยงทางสุขภาพสูงที่สุด ทำให้เด็กตัวเขียวคล้ำ เนื่องจากระดับฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ในเลือดต่ำทำให้ไม่สามารถรับออกซิเจนได้เพียงพอ เนื่องจากแบคทีเรียในลำไส้สามารถเปลี่ยนรูปไนเตรทเป็นไนไตรท์ได้มากขึ้น ไนไตรท์จะถูกดูดซับและรวมตัวกับฮีโมโกลบิน เป็นเม็ทฮีโมโกลบิน (methemoglobin) ซึ่งในผู้ใหญ่จะเปลี่ยนเป็น อ็อกซี-ฮีโมโกลบิน (oxyhaemoglobin) ในเด็กระบบการทำงานของเอนไซม์ยังพัฒนาไม่

สมบูรณ์ ดังนั้นเมธีโมโกลบินจะเพิ่มมาก ส่งผลให้การลำเลียงออกซิเจนเกิดขึ้นได้น้อยลง ทำให้ขาดออกซิเจน ปวดหัว หัวใจเต้นเร็ว ชัก หายใจไม่ออก และเสียชีวิตได้ (Townsend และคณะ, 2003) และไนโตรที่ยังทำให้หลอดเลือดตีตันทำให้ความดันเลือดต่ำลง ตับไม่สามารถสะสมวิตามินเอได้ตามปกติ

นอกจากนี้ น้ำดื่มที่ปนเปื้อนไนเตรทสามารถกระตุ้นให้เกิดโรคมะเร็ง เช่น มะเร็งในระบบทางเดินอาหาร มะเร็งต่อมไทรอยด์ มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ และมะเร็งรังไข่ เป็นต้น (Beman และคณะ, 2005; Townsend และคณะ, 2003; Ward และคณะ, 2005) โดยการเกิดโรคมะเร็งขึ้นกับการทำงานของแบคทีเรียที่ไปเปลี่ยนรูปไนเตรทเป็นสารประกอบไนโตรโซ (Nitroso compounds) โดยการทำปฏิกิริยากับอะมิโนได้เป็นไนโตรซามีน (Nitrosamine) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Weyer และคณะ, 2001) และการได้รับสารประกอบไนโตรโซระหว่างการตั้งครรภ์ก่อให้เกิดเนื้องอกได้ มีความเป็นพิษต่อตัวอ่อนและทำให้เสียชีวิตได้

นอกจากนี้ไนเตรทยังทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำโดยเฉพาะสาหร่าย (Algal Bloom) หรือที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ “Eutrophication” (Badgley และคณะ, 2007) ทำให้สัตว์น้ำตายจำนวนมาก เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงจนไม่เพียงพอต่อการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้ความหลากหลายทางธรรมชาติลดลง อีกทั้งยังทำให้สาหร่ายพิษเพิ่มปริมาณมากขึ้น ซึ่งพิษของสาหร่ายมีผลต่อระบบประสาท เมื่อสัตว์น้ำกินสาหร่ายเหล่านี้พิษสามารถตกค้างในสัตว์น้ำได้ เมื่อมนุษย์บริโภคสัตว์เหล่านั้น ทำให้เกิดภาวะทางประสาท อัมพาต และท้องร่วง เป็นต้น

2.5.3 การปนเปื้อนไนเตรทในแหล่งน้ำใต้ดินของประเทศไทย

ในประเทศไทยพบการปนเปื้อนไนเตรทในน้ำใต้ดินมาจากการเกษตรกรรมเป็นหลัก เนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยและสารเคมี โดยเกษตรกรไทยได้เปลี่ยนจากการทำเกษตรแบบดั้งเดิมเป็นการเกษตรที่ต้องเร่งการเพิ่มผลผลิต มีการจัดระบบชลประทาน และการใช้สารเคมีเกษตรและปุ๋ยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นไนเตรทซึ่งเป็นส่วนประกอบของปุ๋ย จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ไนเตรทเกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยพบว่าแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมมีคุณภาพเสื่อมโทรมลงจากการปนเปื้อนด้วยปุ๋ยและสารเคมีเกษตร (Scanlon และคณะ, 2007)

ทั่วโลกมีการใช้ปุ๋ยเพิ่มขึ้นกว่า 700% ในช่วงเวลา 40 ปีที่ผ่านมา และมีเพียง 5% ของปุ๋ยที่ใส่ทั้งหมดที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ ที่เหลือสูญหายไปเนื่องจากการชะล้างของดิน น้ำ อากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุ

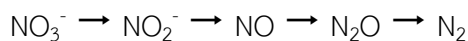
หลักที่ทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลง (Phupaibul และคณะ, 2004) โดยไนโตรเจนในดินเป็นตัวควบคุมปริมาณไนเตรทในน้ำใต้ดิน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพน้ำใต้ดินที่จะนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค ทำให้เริ่มมีการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินในประเทศไทยมากขึ้น เช่น กรมทรัพยากรธรณี (2545) พบน้ำใต้ดินมีปริมาณไนเตรทปนเปื้อน 120 ถึง 380 มิลลิกรัมต่อลิตร และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2550) ได้เก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ย พบว่าเกิดการชะล้างของสารต่างๆ ในปุ๋ยลงสู่น้ำใต้ดิน ซึ่งสารปนเปื้อนส่วนใหญ่ ได้แก่ ไนเตรท และโพแทสเซียม และกรีนพีซ (2550) พบว่าการใช้ปุ๋ยเพื่อการเกษตร มีส่วนทำให้ไนเตรทปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำในการอุปโภคและบริโภคของประชาชน โดยพบการปนเปื้อนของไนเตรทสูงมาก โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคกลาง เช่น จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี ที่พบปริมาณไนเตรทในบ่อน้ำบาดาลสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำที่ใช้ในการบริโภค ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำที่ใช้บริโภคให้มีปริมาณไนเตรทได้ไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5.4 การควบคุมไนเตรท

ไนเตรทเมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในสภาวะสารละลาย ระบบกรองปกติไม่สามารถกำจัดไนเตรทได้ ปริมาณไนเตรทในน้ำดื่มเป็นดัชนีชี้วัดแบบหนึ่งที่ใช้เพื่อควบคุมมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม ซึ่งความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำสามารถรายงานในรูปของไนเตรท-ไนโตรเจน (nitrate-nitrogen) หรือในรูปของไนเตรทไอออน (NO_3^-) ขึ้นกับมาตรฐานของแต่ละประเทศ ซึ่งสามารถเทียบเคียงค่าปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรของไนเตรทไอออน มีค่าความเข้มข้นโดยประมาณเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของไนเตรท-ไนโตรเจน ถึงแม้ว่าไนเตรทเป็นสารจำเป็นต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม แต่ปริมาณความเข้มข้นสูงในน้ำบริโภคเป็นอันตรายอย่างยิ่ง จึงต้องมีกระบวนการในการลดปริมาณไนเตรทในน้ำบริโภคลงให้ได้ตามมาตรฐานน้ำดื่มแต่ละประเทศ โดยการกำจัดไนเตรทสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. **กระบวนการทางเคมี** เช่น กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) และการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวมีราคาค่อนข้างมาก (Rocca และคณะ, 2007)

2. กระบวนการทางชีววิทยา เป็นการให้แบคทีเรียใช้ในเตรทเป็นตัวรีดิวซ์ไนโตรเจนในกระบวนการหายใจในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน สุดท้ายจะได้ก๊าซไนโตรเจนออกมา



วิธีนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย แต่ทำได้ยากเนื่องจากต้องปรับสภาวะแวดล้อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม อีกทั้งยังเกิดปัญหาการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่ตายซึ่งทำให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการบำบัดที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่ใช้บริโภค (Canter, 1997)

3. กระบวนการดูดซับ เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายต่อการควบคุมระบบ การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าตัวดูดซับหลากหลายชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทได้แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2-9 ซึ่งคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นตัวดูดซับ เช่น มีพื้นที่ผิวภายนอกที่มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี และมีรูพรุนจำนวนมาก จึงทำให้ปัจจุบันมีการศึกษาวัสดุหลายชนิดในการดูดซับไนเตรท สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-10 (Bhatnagar และ Sillanpa, 2011)

ตารางที่ 2- 9 ตัวอย่างตัวดูดซับไนเตรทที่มีประสิทธิภาพต่างกัน

ตัวดูดซับ	ปริมาณการดูดซับ (มก./ก.)	ปริมาณไนเตรทเริ่มต้น (มก./ล.)
กากมะพร้าวที่ดัดแปลงหมู่เอมีน	28.52 ⁿ	0-62.0
ถ่านกัมมันต์	4.14	100
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	0.8	0-44.3
ซีพีโอไลต์	3.46	100
ซีพีโอไลต์ที่กระตุ้นด้วย HCl	9.8	100
ผงถ่านไม้ไผ่	1.12	0-44.3

ตารางที่ 2- 10 ตัวอย่างตัวดูดซับที่ใช้ในการกำจัดไนเตรท

วัสดุประเภท คาร์บอน	วัสดุเหลือทิ้ง			วัสดุทาง ชีวภาพ (Biosorbents)	อื่นๆ
	ธรรมชาติ	เกษตรกรรม	อุตสาหกรรม		
ถ่านกัมมันต์	ดินเหนียว	ชานอ้อย	ถั่วลอ	ผงจากไม้ไผ่	นาโนอะลูมินา
Carbon cloth	ซีโอไลต์	แกลบ	โคลนแดง	ไคโตซาน	วัสดุรูพรุนซิลิกา
Carbon nanotubes	ซีพิโอไลต์ (sepiolite)	กะลามะพร้าว	กากแร่ (slag)		Layered double hydroxides
Iron oxide dispersed activated carbon fibers		ฟางข้าวสาลี			ซีเมนต์เพสต์
		เปลือกถั่ว			
		หัวผักกาด			

2.6 กลไกการเกิดการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตะกอน

ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการดูดซับเพื่อลดปริมาณแอนไอออนในน้ำ เพื่อนำน้ำมาใช้ในการอุตสาหกรรม โดยใช้สารจำพวกไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (Hydrous metal oxides) หรือ Basic metal carbonate ของโลหะ เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับโลหะที่มีเวเลนซ์สูงๆ ได้ดี โดยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ประกอบด้วยโลหะไอออนบวกเชื่อมอยู่กับอนุภาคของน้ำ ไฮโดรเจน หรือออกซิเจน อาจรวมถึงโลหะไฮดรอกไซด์ ออกซิไฮดรอกไซด์ และโลหะออกไซด์ ซึ่งอยู่ในดินเหนียว ดิน หรือตะกอน อยู่ในรูปของอนุภาคออกไซด์บนผิวของสารนั้นๆ และองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่คือออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา ทำให้มีแนวโน้มดูดซับประจุลบบนพื้นผิวออกไซด์ของโลหะได้ โดยประจุไฟฟ้าในตะกอน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ประจุเปลี่ยนแปลง (variable charge) หรือ ประจุขึ้นกับค่าพีเอช และประจุถาวร (permanent charge) ซึ่งประจุเปลี่ยนแปลงเกิดปฏิกิริยาโปรตอนเนต (protonation) และดีโปรตอนเนต (deprotonation) ได้ โดยโปรตอนเนตเป็นปฏิกิริยาที่สารรับไฮโดรเจนไอออน ส่วนดีโปรตอนเนตเป็นปฏิกิริยาที่สารให้ไฮโดรเจนไอออนได้ โดยเกิดบนพื้นที่ผิวตะกอน ทำให้พื้นที่ผิวแสดงประจุบวกหรือลบ ได้โดยขึ้นกับพีเอช (pH) ของสารละลาย การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ



นอกจากนั้น pH ของสารละลายยังส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวออกไซด์ของตะกอน การแสดงปริมาณสปีชีส์ M-OH_2^+ เท่ากับสปีชีส์ M-O^- หมายความว่าพื้นผิวของออกไซด์ไม่แสดงประจุ หรือประจุเป็นศูนย์ เรียกว่าค่าพีเอชของสารละลายที่ให้พื้นผิวไม่แสดงประจุ หรือ pH of zero point charge (pH_{zpc}) เมื่อ M แทนอะตอมของโลหะ เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก ซึ่งการที่สารออกไซด์อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า pH_{zpc} ของออกไซด์นั้น พื้นผิวออกไซด์จะมี M-OH_2^+ มากกว่า M-O^- พื้นผิวของออกไซด์จึงแสดงประจุบวกและดูดซับแอนไอออนได้ ดังนั้นไอออนฟลูออไรด์และไนเตรทถูกดูดซับรวมกับไอออนไฮโดรเจนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวโลหะที่ใช้เป็นตัวดูดซับ ดังภาพที่ 2-6

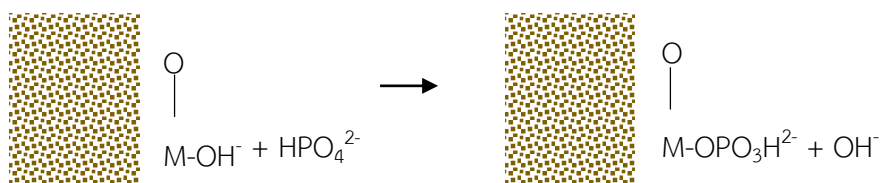


ภาพที่ 2- 6 การดูดซับฟลูออไรด์ที่พื้นผิวของออกไซด์

การที่สารออกไซด์อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH มากกว่า pH_{zpc} ของออกไซด์ พื้นผิวของออกไซด์จะมี M-O^- มากกว่า M-OH_2^+ จึงแสดงประจุลบ เนื่องจากสูญเสีย H^+ ไป แสดงในภาพที่ 2-7 และหมู่แอนไอออนอื่นๆ อาจแทนที่หมู่ไฮดรอกไซด์และเกิดพันธะกับออกไซด์ได้โดยตรง แสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2- 7 พื้นผิวออกไซด์ที่แสดงประจุลบ



ภาพที่ 2- 8 การแทนที่หมู่ไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวออกไซด์ด้วยหมู่แอนไอออนอื่นๆ

ดังนั้นความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนสูงขึ้น (ค่าพีเอชต่ำลง) ปฏิกิริยาโปรตอนเนตเกิดมากขึ้น ส่งผลให้ตะกอนมีประจุบวกมากขึ้น และมีประจุลบน้อยลง จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทมากขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การดูดซับมลสารโดยใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับ

Kayranli (2011) ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าในสารละลายโดยใช้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา โดยสีย้อมที่นำมาใช้ ได้แก่ สีย้อมประจุบวก สีย้อมประจุลบ และสีย้อมไม่มีประจุ ทำการดูดซับแบบทีละเท ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมพีเอชในสารละลายเท่ากับ 5 และเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2 ถึง 7 กรัม พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับไม่ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น และผลการศึกษาสรุปได้ว่าตะกอนมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม เนื่องจากตะกอนประกอบไปด้วยแร่ดินเหนียว โลหะออกไซด์ที่ปกคลุมที่พื้นผิวตะกอน ทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ โดยแร่ดินเหนียวมีความคงตัวสูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และมีความสามารถในการดูดซับ มีโครงสร้างและคุณสมบัติที่พื้นผิวที่หลากหลาย อีกทั้งโลหะออกไซด์ยังมีความสามารถในการดูดซับสูง โดยการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และเป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

Fan และคณะ (2017) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย โดยเผาตะกอนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำมาคัดขนาดผ่านตะแกรงขนาด 0.15 มิลลิเมตร ใช้ตะกอน 6 กรัม ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พบว่าตะกอนมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น C, O, Si, Al ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 16.21 มก/ก. หรือ 98% โดยมีสมดุลการดูดซับอยู่ที่ 8-10 ชั่วโมง การดูดซับเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า โดยที่พีเอชต่ำ การดูดซับลดลง เนื่องจาก H^+ ปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับ ทำให้พื้นผิวมีประจุบวก จึงขัดขวางการดูดซับสีย้อมซึ่งมีประจุบวกเช่นเดียวกัน จึงเกิดแรงผลักรมากกว่าแรงดูด เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวด้วย FT-IR และ SEM พบว่าการดูดซับเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไนโตรเจนของสีย้อมและไฮโดรเจนของตะกอน และซิลิกอนไดออกไซด์ของตะกอน โดยเกิดขึ้นกับโครงสร้างแบบอะโรเมติกของสีย้อม นอกจากนั้นยังเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากตะกอนประกอบด้วยโลหะ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ทำให้เกิดการ

แลกเปลี่ยนประจุบวกกับสีย้อมขึ้น โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสอง เสมือน และเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และพบว่าเมื่อลดความเข้มข้นของสีย้อม อัตราการดูดซับลดลง เนื่องจากการถ่ายเทมวลสารเกิดได้ดีที่ความเข้มข้นมวลสารมาก เพราะมีแรงขับสู่พื้นที่ผิวตัวมากขึ้น

Abo-El-Enein และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา โดยนำตะกอนไปอบแห้งและบดให้ได้ขนาดเท่ากัน และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 100, 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในการทดลองใช้ความเข้มข้นของโลหะหนัก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประกอบด้วยออกไซด์ของอะลูมินาและซิลิกา พบในลักษณะเป็นแร่ควอตซ์ที่มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีสมบัติในการดูดซับ และมีแร่โอลไลท์ที่ประกอบด้วยชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประภษชั้นของอะลูมินา ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโพแทสเซียมไอออนขึ้น ส่วนตะกอนที่เผาที่ 500 องศาเซลเซียส พบแร่แอลไบท์ ซึ่งประกอบด้วยอะลูมินซิลิเกต และการเผาทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การดูดซับจะลดลง เนื่องจากความร้อนมากเกินไปทำให้พื้นที่ผิวมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ จึงเกิดการดูดซับได้ยากขึ้น ส่วนที่ 600 องศาเซลเซียส ผลไม่แตกต่างจาก 500 องศาเซลเซียส มากนัก จึงเลือกใช้ 500 องศาเซลเซียส ในการปรับปรุงพื้นที่ผิวตัวดูดซับ เมื่อโดยควบคุมพีเอชสารละลายที่ 5.5 พบว่า การดูดซับเข้าสู่สมดุลที่ 4 ชั่วโมง

2.7.2 การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน

Vinitnantharat และคณะ (2010) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยกรด โดยบดตะกอนให้มีขนาด 2.0-2.5 มิลลิเมตร นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตะกอน 25 กรัม แช่ในสารละลายกรดอะซิติก 250 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.01 ถึง 2.00 โมลาร์ พร้อมให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ตะกอน 50 กรัม ความเข้มข้นฟลูออไรด์ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนพบว่าส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกา สารประกอบอะลูมินา เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซิลิเกต ซึ่งมีผลต่อการดูดซับมวลสาร และตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดมีพื้นที่ผิวที่เรียบและมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วยกรดทำให้ไอออนบวกบางตัว เช่น แคลเซียม เหล็ก และแมกนีเซียม ถูกกำจัด

ออกไปจากพื้นที่ผิว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรด 0.1 ถึง 2 โมลาร์ พบว่าสารละลายมี pH อยู่ระหว่าง 4.12-5.47 ถ้า pH ต่ำกว่า pH_{zpc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.20-6.30 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโปรตอนท ทำให้พื้นผิวดูดซับมีประจุบวกซึ่งช่วยส่งเสริมการดูดซับฟลูออไรด์ โดยตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรด ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุด โดยการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตะกอน เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและการแลกเปลี่ยนลิแกนด์และประจุลบอื่นๆ ได้แก่ ไนเตรท คาร์บอเนต มีผลทำให้การดูดซับฟลูออไรด์ลดลงตามลำดับ จากประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 94.4 เหลือร้อยละ 86.6 และร้อยละ 90.8 เนื่องจากเกิดการแย่งชิงพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้น และการกระตุ้นด้วยกรดช่วยปรับปรุงพื้นที่ผิวดูดซับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Chen และคณะ (2011) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยดินคานูมา เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็น ตัวดูดซับที่ดี เพราะประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา ออกไซด์ของโลหะต่างๆ และพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก โดยนำดินมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร ใช้ปริมาณดิน 20 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้น ฟลูออไรด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่ 2 ชั่วโมง การดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดที่ พีเอช 5-7 เนื่องจากที่พีเอชต่ำกว่านี้จะเกิดกรดไฮโดรฟลูออริกขึ้น และที่พีเอชมากกว่า 7 การดูดซับ จะลดลง เนื่องจาก pH_{zpc} ของดินคานูมา เท่ากับ 6.4 ถ้า pH สารละลายมากกว่า pH_{zpc} จะเกิดปฏิกิริยาดีโปรโนเนทขึ้นมา ทำให้พื้นที่ผิวดูดซับมีประจุลบ จึงเกิดแรงผลักฟลูออไรด์ ทำให้การดูดซับบนพื้นที่ผิวดูดซับลดลง และโลหะออกไซด์สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับน้ำ ทำให้เกิดประจุขึ้นบนพื้นที่ผิวดูดซับ และที่พีเอช 5-7 เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวกของดินและประจุลบของฟลูออไรด์ได้ดีโดยมีอัตราการดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน และการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบฟรอนดลิช และมีประสิทธิภาพการดูดซับ 3.067 มิลลิกรัมต่อกรัม

Shivayogimath, Hiremath และ Lokeshappa (2014) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากชังข้าวโพดและต้นอาเคเซียที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ นำชังข้าวโพดไปอบแห้งและบดให้มีขนาด 0.7-1.2 มิลลิเมตร ส่วนต้นอาเคเซียตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-6 มิลลิเมตร ยาว 10-20 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปล้างและตากให้แห้ง นำตัวดูดซับไปกวนผสมในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวดูดซับไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำล้างมีค่าพีเอชเป็นกลางและนำไปอบให้แห้ง ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสมกวนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ

80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชเป็นกลางและนำไปอบให้แห้ง จากการศึกษาพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 1,065 และ 940 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเผาและการกระตุ้นด้วยเคมีช่วยกำจัดคาร์บอนที่อยู่ในรูพรุนออกไป และการใช้อุณหภูมิมากไปที่ 900 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากความร้อนที่มากไปจะเปลี่ยนองค์ประกอบตัวดูดซับให้กลายเป็นเถ้ามากขึ้นและทำให้ขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นจนเกิดการยุบรวมกันของรูพรุนส่งผลให้พื้นที่ผิวตัวดูดซับลดลง และต้นอาเคเซียและซังข้าวโพดมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์เท่ากับ ร้อยละ 83 และ 81 ตามลำดับ โดยการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ดังนั้นต้นอาเคเซียและซังข้าวโพดสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้ และการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและเคมีทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์มากขึ้น

Lupo และคณะ (2015) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากเปลือกไข่ โดยทำการบดเปลือกไข่ และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบการดูดซับฟลูออไรด์กับตัวดูดซับจากเปลือกไข่ที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยความร้อน พบว่าเปลือกไข่ความจุในการดูดซับเท่ากับ 6.6 ± 0.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนเปลือกไข่ที่นำไปเผามีความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นเท่ากับ 37.4 ± 1.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อขนาดของเปลือกไข่เล็กลง เปลือกไข่ที่สามารถดูดฟลูออไรด์ได้มากที่สุด คือ เปลือกไข่ขนาดบางพิเศษ เปลือกไข่ขนาดบาง และเปลือกไข่ขนาดหนา ตามลำดับ แต่น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้ฟลูออไรด์ตกตะกอนในรูปของแคลเซียมฟลูออไรด์ จึงทำให้ต้องมีการปรับสภาพน้ำให้เป็นกลางโดยการอัดอากาศลงไป ดังนั้นเปลือกไข่ที่เป็นของเสียในครัวเรือนสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้ และการเผาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์

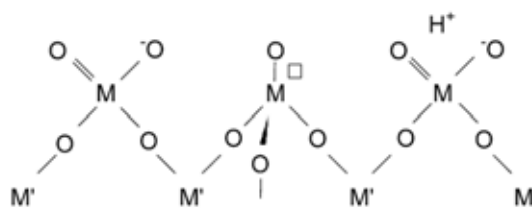
Babu และคณะ (2018) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากกากกาแฟ โดยนำกากกาแฟมาบดและคัดขนาดผ่านตะแกรงขนาด 200 ASTM นำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้ง จากนั้นนำตัวดูดซับไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชเป็นกลาง นำไปอบให้แห้ง โดยผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับ ได้แก่ K_2O , P_2O_5 , CaO ร้อยละ 28.77, 23.60 และ 14.45 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับ 2 กรัม ในสารละลายฟลูออไรด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 4 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 105 นาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด มีค่าความจุในการดูดซับ 9.05

มิลลิกรัมต่อกรัม โดยการดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน และสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ดังนั้นกากกาแฟสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้ และสามารถนำตัวดูดซับมาฟื้นฟูและใช้ซ้ำได้ประมาณ 5 ครั้ง

Gebrewold และคณะ (2018) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยแกลบและซังข้าวโพดในกระบวนการดูดซับแบบที่ละเทและคอลัมน์ พบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและสารเคมีทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์ด้วย EDX พบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของแกลบและซังข้าวโพดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22 เป็น 74% และจากร้อยละ 50 เป็น 76 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยแกลบและซังข้าวโพดที่พีเอช 6.7 เท่ากับร้อยละ 74 และ 65 ตามลำดับ และเมื่อนำตัวดูดซับไปกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล สำหรับแกลบ และใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มอล สำหรับซังข้าวโพด พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 91 และ 89 และมีความจุการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยแกลบและซังข้าวโพดเท่ากับ 7.9 และ 5.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือนและมีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ดังนั้นแกลบและซังข้าวโพดสามารถดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้และการกระตุ้นตัวดูดซับทางเคมีทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น

2.7.3 การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน

Mena-Duran และคณะ (2007) ศึกษาการดูดซับไนเตรทด้วยดินเหนียวที่กระตุ้นด้วยกรดและความร้อน โดยใช้กรด 10 มิลลิลิตรต่อดิน 1 กรัม พร้อมให้ความร้อน 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสารละลายกรดที่ใช้ คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 2 และ 4 โมลาร์ และกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ นำดินไปบดและเผา 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าดินที่กระตุ้นด้วยกรดพื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่มขึ้น และการวิเคราะห์ดินด้วย FT-IR พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความเข้มมากเนื่องจากไฮดรอกไซด์ในสภาพกรดส่งเสริมการดูดซับไนเตรท จากโครงสร้างที่ไม่สมมาตรจะทำให้เกิดความแตกต่างของไดโพลโมเมนต์มาก ทำให้เกิดไอออนบวก จึงเกิดพันธะกับไนเตรทได้ที่บริเวณนี้ (□)



การดูดซับในเตรทความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วยดินที่กระตุ้นด้วยกรดและความร้อน ปริมาณ 0.2 และ 1 กรัม พบว่าดินที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการดูดซับในเตรทที่ดีที่สุด และเมื่อวิเคราะห์ดินด้วย FT-IR พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างคลอไรด์จากโพแทสเซียมคลอไรด์ในดินและไนเตรทในสารละลาย และโครงสร้างผลึกดินแบบ crystalline ลดลงเมื่อมีการกำจัดไนเตรทมากขึ้น

Katal และคณะ (2012) ศึกษาการดูดซับไนเตรทโดยใช้แกลบ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของแกลบ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ โพแทสเซียมไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ตามลำดับ การดูดซับในเตรทความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้แกลบ 0.4 กรัม พบว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ 90 นาที และที่พีเอช 7 ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 94.3% อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือนและการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช การดูดซับลดลงเมื่อมีประจุลบอื่นๆ ในสารละลายมากขึ้น เนื่องจากเกิดการแข่งขันการดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น โดยประจุลบที่ส่งผลต่อการดูดซับไนเตรท ได้แก่ คาร์บอเนต คลอไรด์ ฟอสเฟต และซัลเฟต ตามลำดับ

Zhang และคณะ (2012) ศึกษาการดูดซับไนเตรทด้วยแกลบโดยนำไปเผา พบว่าการนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิต่ำจนถึง 600 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นแต่ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวลดลง โดยการเผาที่อุณหภูมิต่ำจนถึง 600 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 2,802 ตารางเมตรต่อกรัม และความจุในการดูดซับไนเตรทเท่ากับ 70.2 มิลลิกรัมต่อกรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทร้อยละ 70.6 การดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน และสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ นอกจากนั้นพลังงานอิสระกิบส์มีค่าเท่ากับ -17.0 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง ดังนั้นแกลบสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไนเตรทในน้ำได้ โดยการกระตุ้นด้วยความร้อนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ

Bekele และคณะ (2014) ศึกษาการกำจัดไนเตรทด้วยดินเบนโทไนท์ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ คือ SiO_2 และ Al_2O_3 มีความสามารถในการดูดซับ โดยทำการกระตุ้นดินด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5-4 โมลาร์ พบว่าการใช้กรดความเข้มข้น 2 โมลาร์ ทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนในการดูดซับดีที่สุด การดูดซับเกิดเนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวก เช่น การแทนที่ของไฮโดรเจนไอออน (H^+)

และเกิดการกำจัดสารไม่บริสุทธิ์ต่างๆ เช่น แคลไซต์ ออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ และความเข้มข้นกรดที่มากเกินไปทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเกิดการย่อยสลายของพื้นที่ผิว ในการทดลองใช้ดิน 50 กรัม แซ่ในสารละลายกรด 2 โมลาร์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง จากนั้นล้างดินให้มีพีเอชประมาณ 6 ก่อนนำไปอบแห้ง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของดินที่ไม่ได้กระตุ้น และดินที่กระตุ้นด้วยกรด ด้วย FT-IR พบว่าดินประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกไซด์จากโมเลกุลน้ำที่เกาะบนพื้นผิว หมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะกับ Al^{3+} ในชั้นออกตะฮีดรอล Si-O จากโครงสร้างของดินที่มีซิลิกามาก O-Al และ Si-O-Si ตามลำดับ ส่วนที่พบในดินเบนโทไนต์ที่ไม่ได้กระตุ้น ได้แก่ $AlAlOH$, $AlFeOH$ และ $AlMgOH$ ตามลำดับ ทำให้ทราบว่ากรกระตุ้นด้วยกรดสามารถกำจัด Al, Mg, และ Fe ได้บางส่วน อีกทั้งการกระตุ้นด้วยกรดทำให้เกิดโครงสร้างซิลิกาขึ้น ซึ่งทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนการทดลองการดูดซับที่ใช้ดิน 2 กรัม สารละลายไนเตรทความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอชเท่ากับ 5 พบว่าเข้าสู่สมดุลที่ 90 นาที และการที่พื้นผิวดินประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะ การกระตุ้นดินด้วยกรด ทำให้พื้นผิวดินมีลักษณะเป็นไฮดรอกซิเลทที่มีประจุขึ้น จึงเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไนเตรท และออกไซด์ของโลหะได้ โดยการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ ซึ่งการแสดงประจุบนพื้นที่ผิวของดินเบนโทไนต์ขึ้นกับพีเอชในสารละลาย โดยการดูดซับไนเตรทมากขึ้นเมื่อพีเอชต่ำลง เนื่องจากพื้นที่ผิวดินแสดงประจุบวก และการกำจัดไนเตรทลดลงเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการอิมมัตที่บริเวณดูดซับของดิน และการเข้าถึงบริเวณดูดซับทำได้น้อยลง การดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และมีค่า R_L เท่ากับ 0.13 ซึ่งอยู่ระหว่าง 0-1 แสดงว่าการดูดซับของดินเบนโทไนต์เกิดขึ้นดี กำจัดไนเตรทได้มากกว่าร้อยละ 80

Dehestaniathar และ Rezaee (2014) ศึกษาการดูดซับไนเตรทด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกอัลมอนต์โดยนำไปต้มใน Fe , $Fe_2(SO_4)_3$ และ $FeSO_4$ และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปล้างด้วยกรดเพอร์คลอริกและน้ำกลั่น และนำไปอบให้แห้ง ก่อนนำไปบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร ในการทดลองใช้ความเข้มข้นไนเตรท 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิเมตร เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที พีเอชสารละลายเท่ากับ 6.2 ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นที่ผิวสามารถกำจัดไนเตรทได้ร้อยละ 10-15 ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วย $FeSO_4$ และ $Fe_2(SO_4)_3$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทมากที่สุด โดยสามารถกำจัดไนเตรทได้ร้อยละ 70-80 ภายในเวลา 30 นาที และการดูดซับใช้เวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 45 นาที ความจุในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วย $Fe_2(SO_4)_3$ และ $FeSO_4$ เท่ากับ 14 และ 15

มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยการกระตุ้นด้วย FeSO_4 และ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ช่วยเพิ่มรพุนที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับและพื้นที่ผิวแสดงประจุบวกมากขึ้น ทำให้ดูดซับประจุลบได้มากขึ้น ดังนั้นเปลือกอัลมอนต์นำมาใช้เป็นตัวดูดซับไนเตรทในน้ำได้ และการกระตุ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

Rajeswari, Amalraj และ Pius (2016) ศึกษาการดูดซับไนเตรทด้วยไคโตซานผสมโพลิเอทิลีน ไกลคอล และไคโตซานผสมโพลิ ไวนิล แอลกอฮอล์ ในระบบดูดซับแบบที่ละเท โดยใช้ตัวดูดซับ 0.1 กรัม ไนเตรทความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของไคโตซานผสมโพลิเอทิลีน ไกลคอล และไคโตซานผสมโพลิ ไวนิล แอลกอฮอล์พบว่าพื้นที่ผิวตัวดูดซับมีขนาดรพุนเท่ากับ 16.238 และ 15.515 นาโนเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.679 และ 1.948 ตารางเมตรต่อกรัม การดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสอง เสมือน และสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช โดยมีความจุการดูดซับเท่ากับ 50.68 และ 35.03 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.8 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำตะกอน ดิน หรือวัสดุต่างๆ มาดูดซับมลสารต่างๆ รวมถึงฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีที่สามารถดูดซับมลสารได้ เช่น มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ คือ ออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา ที่มีส่วนช่วยในการดูดซับมลสารในน้ำได้ รวมทั้งหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่สามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างมลสารและพื้นที่ผิวตัวดูดซับได้ เป็นต้น และการเพิ่มประสิทธิภาพดินด้วยการเผากระตุ้นด้วยกรดและด่าง พบว่าทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยกรด ความเข้มข้นที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ในช่วง 0.1-2 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ทำให้น้ำมีพีเอชเกินค่ามาตรฐานน้ำสำหรับการบริโภค ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจการนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปากลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งโดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำ โดยใช้การดูดซับแบบที่ละเท เนื่องจากตะกอนมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับสำหรับใช้ในงานสิ่งแวดล้อมได้ โดยทำการกระตุ้นตะกอนด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 300-700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรด และกระตุ้นด้วยด่าง ความเข้มข้น 0.1-1 โมลาร์

ตารางที่ 2- 11 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับมลสารต่างๆ ในน้ำ

ผู้วิจัย	การทดลอง				ผลการทดลอง
	มลสาร	ความเข้มข้น มลสารเริ่มต้น (มก./ล.)	ปริมาณ ตัวดูดซับ (กรัม)	การปรับปรุง สภาพ	
Kayranli และคณะ (2011)	สีย้อมผ้า	25	2-7	-	ตะกอนดูดซับสีย้อมผ้าได้เพราะที่ พื้นที่ผิวประกอบด้วยแร่ดินเหนียว มีความคงตัวสูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะ หลากหลายและมีโลหะออกไซด์ที่ มีความสามารถในการดูดซับ
Fan และคณะ (2017)	สีย้อม เมทิลีนบลู	50, 100, 150	6	การเผา	- มีประสิทธิภาพการดูดซับ 98% - องค์ประกอบทางเคมีเป็น C, O, Si, Al ซึ่งช่วยในการดูดซับ - การดูดซับเกิดจากแรงดึงดูดทาง ไฟฟ้า ที่ pH ต่ำทำให้ H ⁺ ปกคลุม พื้นที่ผิว พื้นที่ผิวจึงแสดงประจุบวก และเกิด H-bond ที่ไนโตรเจนกับ ไฮโดรเจนของตะกอน
Abo-El- Enein และคณะ (2017)	โลหะหนัก	100	2	การเผา	-องค์ประกอบทางเคมีเป็น Si และ Al ช่วยในการดูดซับ และเกิดการ แลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง K ⁺ -การเผาที่ 500°C มีการดูดซับดี สุด ทำให้ช่องว่างในรูพรุนมากขึ้น จากการกำจัดมลสารในช่องว่าง - ที่ 700°C การดูดซับลดลง ความ ร้อนมากไปทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กไป

ตารางที่ 2- 12 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน

ผู้วิจัย	การทดลอง				สรุปผลการทดลอง
	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	การปรับปรุงสภาพ	
Vinitnatharat และคณะ (2010)	ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย	10 และ 20	50	การเผา และ สารเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - การกระตุ้นด้วยกรดทำให้การดูดซับดีขึ้น - พีเอชในสารละลายทำให้เกิดปฏิกิริยาโปรตอนและดีโปรตอน มีผลต่อประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับ - การดูดซับมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ - ไอออนลบ NO_3^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-} ให้การดูดซับลดลง
Chen และคณะ (2011)	ดินคานูมา	10	20	-	<ul style="list-style-type: none"> - ดินประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินา โลหะออกไซด์ ซึ่งช่วยในการดูดซับ - การดูดซับเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เป็นผลมาจากพีเอชในสารละลาย (pH 5-7 ดูดซับดีที่สุด)
Shivayogimath และคณะ (2014)	ซังข้าวโพดและต้นอาเคเซีย	-	-	การเผา และ สารเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - การเผาที่ 800°C ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมากที่สุด - การเผาและการแช่กรดช่วยกำจัดคาร์บอนที่อยู่ในรูพรุนออกไป - ต้นอาเคเซียและซังข้าวโพดสามารถกำจัดฟลูออไรด์เท่ากับร้อยละ 83 และ 81 ตามลำดับ โดยการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

ตารางที่ 2- 12 (ต่อ) ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตะกอน

ผู้วิจัย	การทดลอง				สรุปผลการทดลอง
	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	การปรับปรุงสภาพ	
Lupo และคณะ (2015)	เปลือกไข่	1.9	-	การเผา	-เปลือกไข่ที่กระตุ้นด้วยการเผามีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าเปลือกไข่ที่ไม่ได้กระตุ้น
Babu และคณะ (2018)	กากกาแฟ	20	2		-องค์ประกอบหลักของตัวดูดซับ ได้แก่ K_2O , P_2O_5 , CaO -ค่าความจุในการดูดซับ 9.05 มิลลิกรัมต่อกรัม -เป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน และสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
Gebrew old และคณะ (2018)	แกลบ และขี้ข้าวโพด	-	-	การเผา และ สารเคมี	-การกระตุ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ -ความจุการดูดซับด้วยแกลบ และขี้ข้าวโพดเท่ากับ 7.9 และ 5.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ -เป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือนและเข้ากันได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

ตารางที่ 2- 13 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ และตัวดูดซับจากตะกอน

ผู้วิจัย	การทดลอง				สรุปผลการทดลอง
	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	การปรับปรุงสภาพ	
Mena-Duran และคณะ (2007)	ดินเหนียว	40	0.2 และ 1	การเผา และ สารเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - ดินเหนียวที่กระตุ้นด้วย HCl ดูดซับได้มากที่สุด เพราะมีพื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่ม - โครงสร้างดินไม่สมมาตร ทำให้มีความแตกต่างของไดโพลโมเมนต์ จึงเกิดไอออนบวก ทำให้เกิดพันธะกับไนเตรทได้ดี - ผลวิเคราะห์ FT-IR พบว่าการดูดซับมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Cl^- และ NO_3^- และจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า
Katal และคณะ (2012)	แกลบ	50	0.4	-	<ul style="list-style-type: none"> - องค์ประกอบแกลบ SiO_2, K_2O, Al_2O_3 เข้าสู่สมดุลที่ 90 นาที อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือนและไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช - ประจุลบที่ทำให้การดูดซับลดลง คือ CO_3^{2-}, Cl^-, PO_4^{3-}, SO_4^{4-} เกิดการแข่งขันการดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

ตารางที่ 2- 13 (ต่อ) ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน

ผู้วิจัย	การทดลอง				สรุปผลการทดลอง
	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	การปรับปรุงสภาพ	
Zhang และคณะ (2012)	แกลบ	-	-	การเผา	<ul style="list-style-type: none"> - การเผาทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น - ความจุในการดูดซับ = 70.2 มิลลิกรัมต่อกรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทร้อยละ 70.6 - เป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน และสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์
Bekele และคณะ (2014)	ดินเบนโทไนต์	250	2	สารเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - องค์ประกอบดิน ได้แก่ SiO_2, Al_2O_3 - การกระตุ้นดินทำให้พื้นผิวและรูพรุนเพิ่ม - พื้นที่ผิวประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะ เมื่อกระตุ้นดินทำให้พื้นผิวมีลักษณะเป็นไฮดรอกซีเลทที่มีประจุ - ความเข้มข้นกรดมากไปทำให้โครงสร้างเปลี่ยนและพื้นที่ผิวย่อยสลายจึงดูดซับได้น้อยลง - การดูดซับเป็นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ จากการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กัน

ตารางที่ 2- 13 (ต่อ) ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติและตัวดูดซับจากตะกอน

ผู้วิจัย	การทดลอง				สรุปผลการทดลอง
	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	การปรับปรุงสภาพ	
Dehestaniathar และ Rezaee (2014)	เปลือกอัลมอนต์	20	-	สารเคมี	-ตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นกำจัดไนเตรทได้ร้อยละ 70-80 -ความจุในการดูดซับเท่ากับ 14 - 15 มิลลิกรัมต่อกรัม -การกระตุ้นช่วยเพิ่มรูพรุนที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับและทำให้ตัวดูดซับแสดงประจุบวกมากขึ้น
Rajeswari, Amalraj และ Pius (2016)	โคโคซาน	10	0.1	สารเคมี	-เป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน และสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช

ตารางที่ 2- 14 งานวิจัยที่ทำการศึกษา

ผู้วิจัย	ตัวดูดซับ	มลสาร	การเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับ	กระบวนการดูดซับ
เบญจพร (2561)	ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา	ฟลูออไรด์และไนเตรท	-เผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500, 600, 700°C -กระตุ้นด้วย HCl 0.1, 0.5, 1 โมลาร์ -กระตุ้นด้วย NaOH 0.1, 0.5, 1 โมลาร์	- ทีละเท

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำของเสีย ได้แก่ ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปา กลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งเพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น โดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับมลสารในน้ำ ซึ่งมลสารที่สนใจศึกษา ได้แก่ ฟลูออไรด์และไนเตรท โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัย ดังนี้ การเตรียมตัวดูดซับและน้ำสังเคราะห์ การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของตะกอน การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ โดยการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ กลไกการดูดซับและไอโซเทอมการดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว การศึกษาการดูดซับในน้ำมลสารรวม การศึกษาผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับ และการศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ดำเนินงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 10 อาคารวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย) โดยควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับงานวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)
2. เครื่อง Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX)
3. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)
4. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
5. เครื่อง Surface Area Analyzer
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
7. เครื่อง Dynamic light scattering (DLS)
8. ตู้อบความร้อน (Oven) ยี่ห้อ WTB Binder รุ่น Model 400(E2)
9. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Ashing Furnace) ยี่ห้อ Carbolite, England รุ่น AAF 11/18/20
10. เครื่องเขย่า (Rotary Agitators)
11. เครื่อง Ion Chromatography ยี่ห้อ Dionex รุ่น ICS-2500 Automated IC System
12. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 3100S
13. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE214S
14. เครื่องผลิตน้ำบริสุทธิ์สำหรับห้องปฏิบัติการ 18 เมกะโอมห์ ยี่ห้อ ELGA รุ่น OPTION R7 Maxima
15. เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic bath) ยี่ห้อ Bandelin รุ่น RK 156
16. โกร่งบดสาร (mortar and pestle)
17. ตะแกรงคัดขนาด (Sieve)
18. ถ้วยระเหย หรือถ้วยระเหยสาร (Evaporating dish)
19. ปีกเกอร์ (Beaker)
20. หลอดทดลอง (Test tube)
21. ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (Rack)
22. ปิเปตแบบปริมาตร (Volume pipette)

23. ไมโครปิเปต (Micropipette)
24. ไมโครปิเปตทิป (Micropipette tip)
25. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
26. ขวดเก็บตัวอย่าง (Conical bottom plastic vial)
27. นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch)
28. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
29. กระดาษกรอง เบอร์ 40 (ขนาด 125 มิลลิเมตร, Whatman)

3.2.2 สารเคมี

1. โซเดียมไนเตรท (Sodium Nitrate) จากบริษัท คาร์โลเออร์บา จำกัด
2. โซเดียมฟลูออไรด์ (Sodium Fluoride) เกรด Analytical reagent (ความบริสุทธิ์มากกว่า 99.9%) จากบริษัท วิดัลบลิวาร์ อินเตอร์ เนชั่นแนล จำกัด
3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ความเข้มข้น 37% จากบริษัท คาร์โลเออร์บา จำกัด
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) ความบริสุทธิ์ 99% จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด
5. สารละลายไนเตรทมาตรฐาน (Nitrate standard solution) จากบริษัท เมอร์ค จำกัด
6. สารละลายฟลูออไรด์มาตรฐาน (Fluoride standard solution) จากบริษัท เอสซีพี ไชน่า จำกัด
7. สารละลายคลอไรด์มาตรฐาน (Chloride standard solution) จากบริษัท เมอร์ค จำกัด
8. สารละลายซัลเฟตมาตรฐาน (Sulfate standard solution) จากบริษัท เอสซีพี ไชน่า จำกัด
9. สารละลายแมกนีเซียมมาตรฐาน (Magnesium standard solution) จากบริษัท เอสซีพี ไชน่า จำกัด
10. สารละลายแคลเซียมมาตรฐาน (Calcium standard solution) จากบริษัท เอสซีพี ไชน่า จำกัด
11. สารละลายโซเดียมมาตรฐาน (Sodium standard solution) จากบริษัท เอสซีพี ไชน่า จำกัด

12. โซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮไดรส์ (Na_2CO_3) เกรตวิเคราะห์ จากบริษัท เอแจ็กซ์ ไลน์เคม จำกัด มหาชน
13. โซเดียมไบคาร์บอเนตแอนไฮไดรส์ (NaHCO_3) เกรตวิเคราะห์ จากบริษัท เอแจ็กซ์ ไลน์เคม จำกัด มหาชน
14. น้ำกลั่นปราศจากอออน (D.I. water)

3.3 การเตรียมตัวดูดซับ สารละลาย ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

วิธีการเตรียมการดูดซับดัดแปลงจากงานวิจัยของ Cengeloglu และคณะ (2002); Wang และ Reardon (2001) งานวิจัยนี้ตัวดูดซับที่ใช้มาจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ได้มาจากขั้นตอนหลังการรีดตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาของบริษัท ประปาพทุธานี จำกัด โดยตัวดูดซับที่เตรียมจากตะกอนมีดังนี้

1. ตะกอนที่ไม่ถูกกระตุ้น (SN)
2. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (S300)
3. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (S400)
4. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (S500)
5. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (S600)
6. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (S700)
7. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (SA0.1)
8. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (SA0.5)
9. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ (SA1)
10. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (SB0.1)
11. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (SB0.5)
12. ตะกอนที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (SB1)

3.3.1.1 ตะกอนไม่ถูกกระตุ้น

1. นำมาแยกตะกอนและสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่ออก จากนั้นนำตะกอนมาอบให้แห้งในตู้อบความร้อนอุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เนื่องจากตะกอนที่เก็บมามีน้ำอยู่ปริมาณมาก
2. นำตะกอนที่ได้ไปล้างน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง
3. นำตะกอนที่อบแห้งแล้วมาบดและร่อนผ่านระหว่างตะแกรงเบอร์ 12 และตะแกรงเบอร์ 8 เพื่อให้ได้ขนาดที่คละกันสม่ำเสมอตั้งแต่ 1.68 ถึง 2.38 มิลลิเมตร
4. เก็บตะกอนดูดซับในที่แห้ง

3.3.1.2 ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อน

1. นำตะกอนดูดซับที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1.1 มาเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำตะกอนดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน ไปล้างน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปอบในตู้อบความร้อนให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส
3. เก็บตะกอนดูดซับที่เผาแล้วในที่แห้ง

3.3.1.3 ตะกอนดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

1. นำตะกอนที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1.1 มาแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนตะกอนต่อปริมาตรของสารละลายกรดเท่ากับ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. นำตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดแล้วไปล้างน้ำปราศจากไอออน จนค่าพีเอชน้ำที่ใช้ล้างตะกอนมีค่าใกล้เคียงพีเอชน้ำปราศจากไอออน
3. นำตะกอนไปอบในตู้อบความร้อนให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดแล้วในที่แห้ง

3.3.1.4 ตะกอนดูดซับที่กระตุ้นด้วยต่าง

1. นำตะกอนที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1.1 มาแขวนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนตะกอนต่อปริมาตรของสารละลายต่างเท่ากับ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. นำตะกอนที่กระตุ้นด้วยต่างแล้วไปล้างน้ำปราศจากไอออน จนค่าพีเอชน้ำที่ใช้ล้างตะกอนมีค่าใกล้เคียงพีเอชน้ำปราศจากไอออน
3. นำตะกอนไปอบในตู้อบความร้อนให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตะกอนที่กระตุ้นด้วยต่างแล้วในที่แห้ง

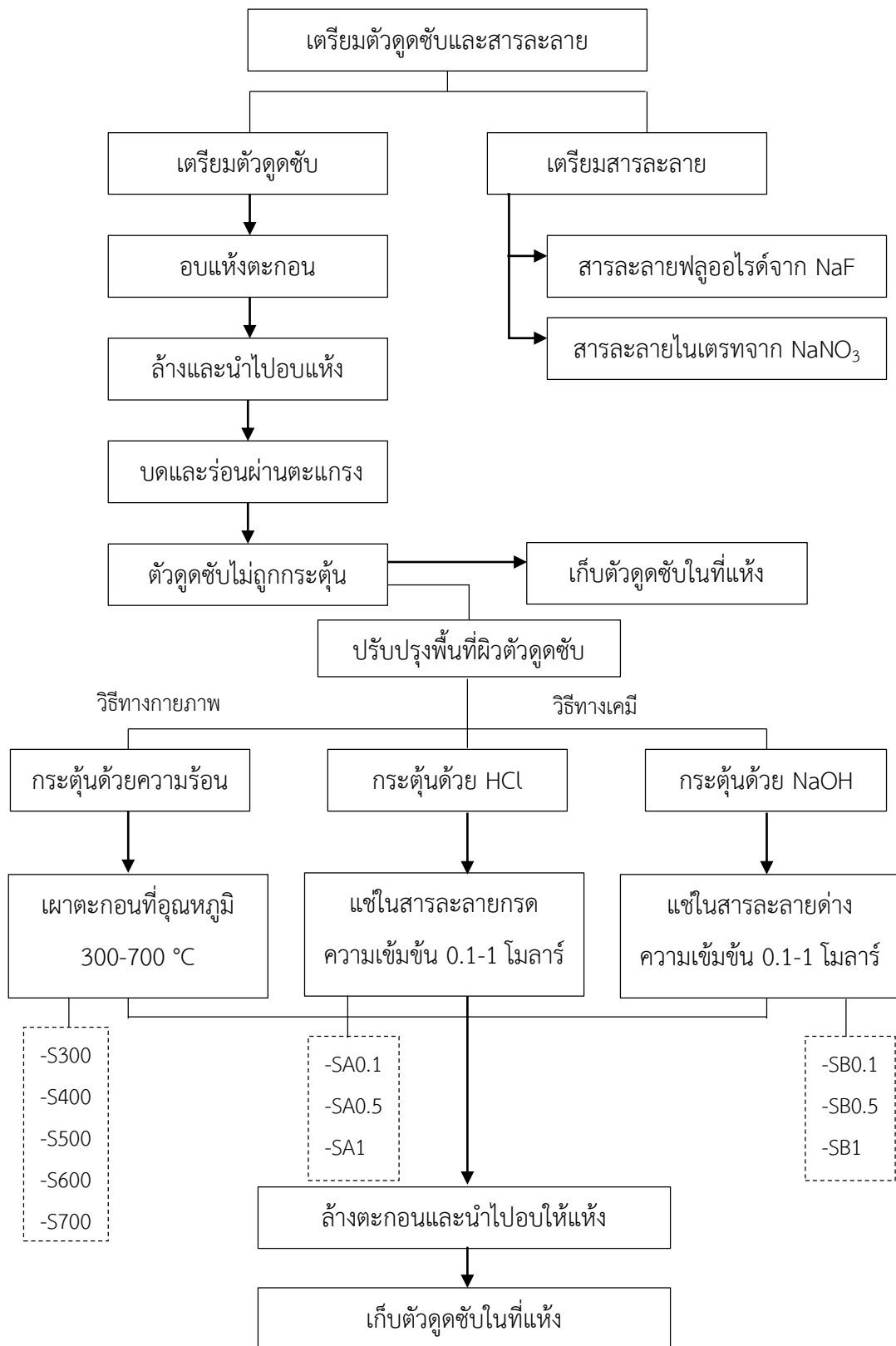
3.3.2 การเตรียมสารละลาย

3.3.2.1 การเตรียมสารละลายฟลูออไรด์สังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) 0.221 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร
2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นต่างๆ จากการเจือจางสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เตรียมไว้

3.3.2.2 การเตรียมสารละลายไนเตรทสังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายไนเตรทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) 0.137 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร
2. เตรียมสารละลายไนเตรทความเข้มข้นต่างๆ จากการเจือจางสารละลายไนเตรทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เตรียมไว้



ภาพที่ 3- 2 การเตรียมตัวดูดซับและสารละลาย

3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

ทำการศึกษาศสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3- 1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร	Thermogravimetric analysis (TGA)
ปริมาณแร่ธาตุต่างๆ	Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)
โครงสร้างผลึก	X-ray Powder Diffractometer (XRD)
พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	Nitrogen Adsorption/Desorption isotherm (BET)
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
ประจุบนพื้นผิว (PZC)	Dynamic light scattering (DLS)

1. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อน การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Pyris diamond ภายใต้สภาวะก๊าซออกซิเจน ตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 900 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

2. การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุต่างๆ การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในเชิงคุณภาพและปริมาณโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-4800 ซึ่งติดตั้งเครื่องวัดปริมาณเฉพาะไว้ คือ Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) โดยใช้สัญญาณเอกซเรย์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-rays) ของธาตุที่แตกต่างกันด้วยสเปกตรัมเชิงพลังงาน

3. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เครื่อง X-ray Powder Diffractometer ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smartlab โดยวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนในช่วงมุม (2-theta) 5 ถึง 100 องศา

4. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุน วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุน ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb-1 โดยซอฟต์แวร์ Quantachrome AS1Win เวอร์ชัน 2.02 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ไอโซเทอม การดูดซับและการคายซับไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ 77 องศาเซลเซียส

5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet Nexus iS5 วิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคป ในช่วงสเปกตรัม 650 - 4,000 ซม.⁻¹

6. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้กำลังขยาย 3,000, 5,000 และ 10,000 เท่า

7. การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว (pH Point of zero charge; pH_{zpc}) การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวด้วยเครื่อง Dynamic light scattering (DLS) เป็นเทคนิควัดการกระเพื่อมของความเข้มแสง เป็นการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) วัดที่ค่าพีเอชของสารละลายที่ 4, 5, 6, 7 และ 8

3.5 การศึกษาการดูดซับและการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับจากตะกอน

เนื่องจากการศึกษาการปนเปื้อนฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำใต้ดินของประเทศไทยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์และไนเตรทเกินค่ามาตรฐานน้ำสำหรับการบริโภคอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 45-100 มิลลิกรัม ตามลำดับ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์และไนเตรทอยู่ที่ 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่า การเขย่าด้วยความเร็ว 100-200 รอบต่อนาที จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด แต่ในการทดลองนี้ต้องใช้เครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary) เนื่องจากการเขย่าแบบนี้ทำให้ตะกอนลอยอยู่ในสารละลายได้ ตะกอนจึงสัมผัสกับสารละลายได้ทุกพื้นที่ผิวพร้อมกัน และเมื่อทำการทดลองหมุนด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที พบว่าความเร็วมากไปทำให้ตะกอนแตกออก ดังนั้นจึงทดลองลดรอบความเร็วที่ใช้ และพบว่าความเร็วในการหมุน 50 รอบต่อนาที ไม่ทำให้ตัวดูดซับเสียหาย และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทอยู่ในช่วงพีเอช 5.5-7 ซึ่งเมื่อวัดพีเอชในสารละลายที่ใช้ในการทดลอง พบว่ามีพีเอชอยู่ในช่วงดังกล่าว จึงไม่ทำการทดลองหา

ผลกระทบจากค่าพีเอชในสารละลาย และทำการวัดพีเอชตลอดการทดลอง เพื่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในสารละลาย

3.5.1 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำมลสารเดี่ยว

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์

1. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชสารละลายเริ่มต้น
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายชั่วโมงที่ 2, 4, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และทำการวัดพีเอชหลังเก็บตัวอย่าง
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography
7. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนตัวดูดซับเป็น S300, S400, S500, S600, S700, SA0.1, SA0.5, SA1, SB0.1, SB0.5 และ SB1

2. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

1. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

7. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนตัวดูดซับเป็น S300, S400, S500, S600, S700, SA0.1, SA0.5, SA1, SB0.1, SB0.5 และ SB1

3.5.2 การศึกษาการดูดซับไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยว

การวิเคราะห์การดูดซับไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยวจะคัดเลือกตัวดูดซับบางตัวดูดซับที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานจากการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ที่ผ่านมา

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรท

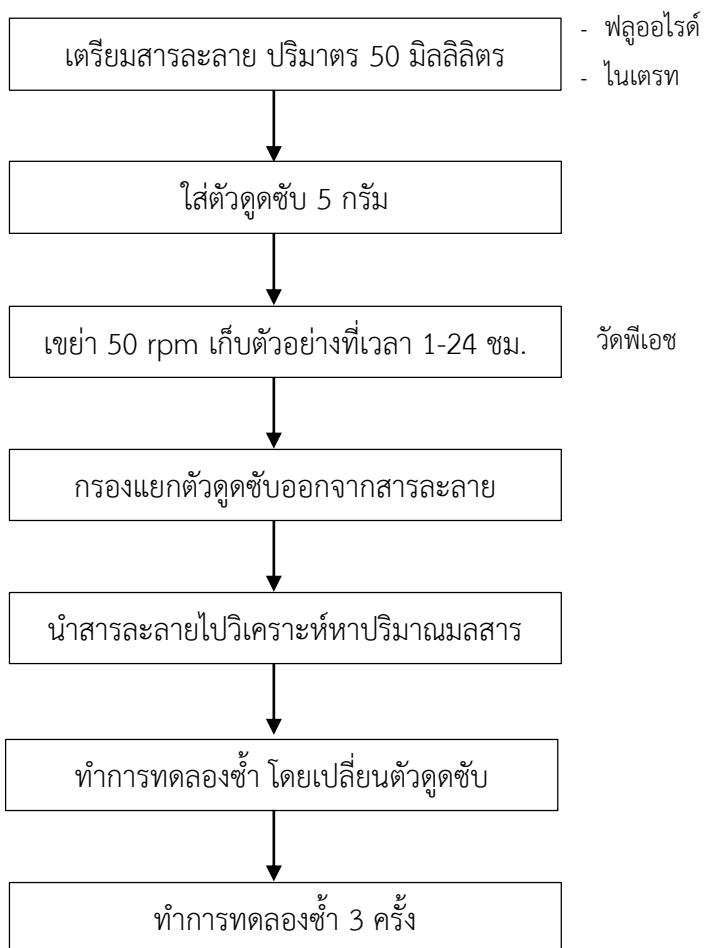
1. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชสารละลายเริ่มต้น
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายชั่วโมงที่ 2, 4, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และทำการวัดพีเอชหลังเก็บตัวอย่าง
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตะกอนดูดซับออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง Ion Chromatography
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับ

2. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท

1. เตรียมสารละลายไนเตรทความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกตะกอนดูดซับออกจากสารละลาย

6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง Ion Chromatography

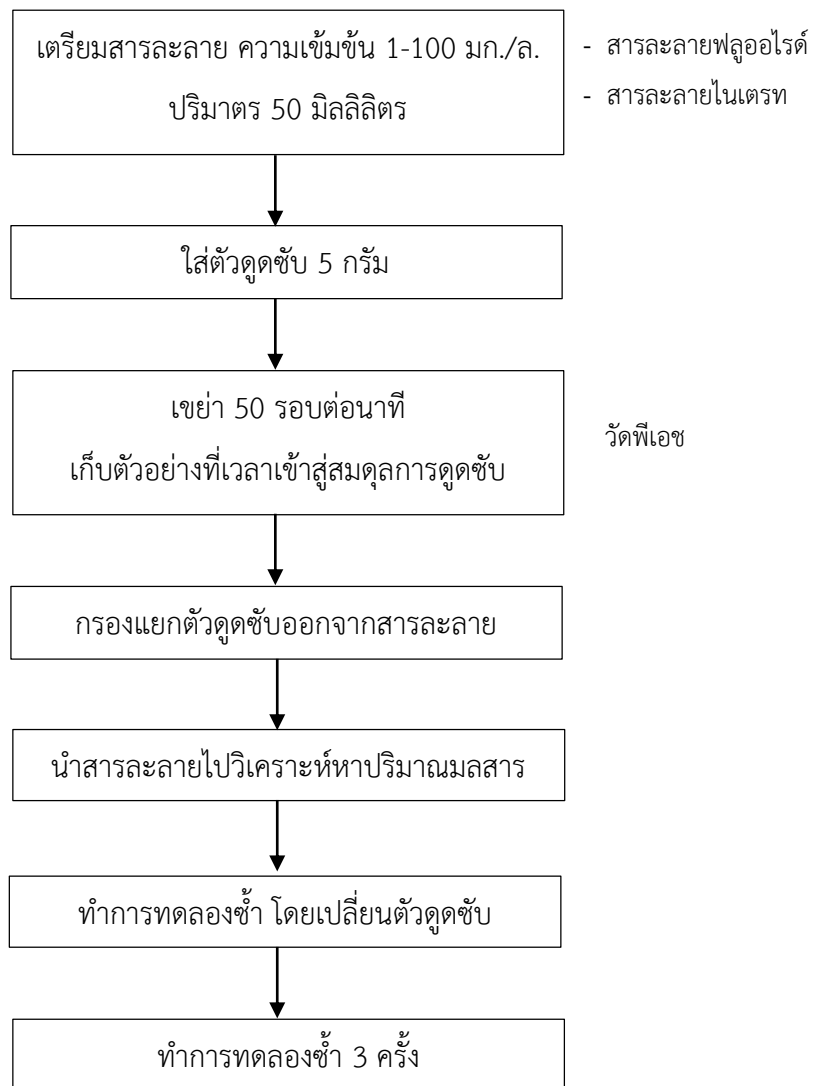
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับ



ภาพที่ 3- 3 ขั้นตอนการศึกษากลยุทธ์การดูดซับ

ตารางที่ 3- 2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ตัวแปร	พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรต้น	ชนิดของตัวดูดซับ	1. SN 7. SA0.1 2. S300 8. SA0.5 3. S400 9. SA1 4. S500 10. SB0.1 5. S600 11. SB0.5 6. S700 12. SB1
	ชนิดของสารละลาย	1. สารละลายฟลูออไรด์ 2. สารละลายไนเตรท
	เวลาที่ใช้ในการทดลอง	1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 นาที และ 2, 4, 6, 12, 18, 24 ชม.
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นสารละลายฟลูออไรด์ที่เหลือ	-
	ความเข้มข้นสารละลายไนเตรทที่เหลือ	-
ตัวแปรควบคุม	ชนิดของตัวดูดซับ	ตะกอนน้ำประปา จากบริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด
	ขนาดของตัวดูดซับ	1.68 - 2.38 มิลลิเมตร
	ปริมาณตัวดูดซับ	5 กรัม
	ปริมาณสารละลาย	50 มิลลิลิตร
	ความเข้มข้นของสารละลายฟลูออไรด์	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรท	50 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ความเร็วรอบในการปั่นกววน	50 รอบต่อนาที
	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบตัวดูดซับ	103±2 องศาเซลเซียส
	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	25±2 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3- 4 ขั้นตอนการศึกษาไอโซโทมการดูดซับ

ตารางที่ 3- 3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

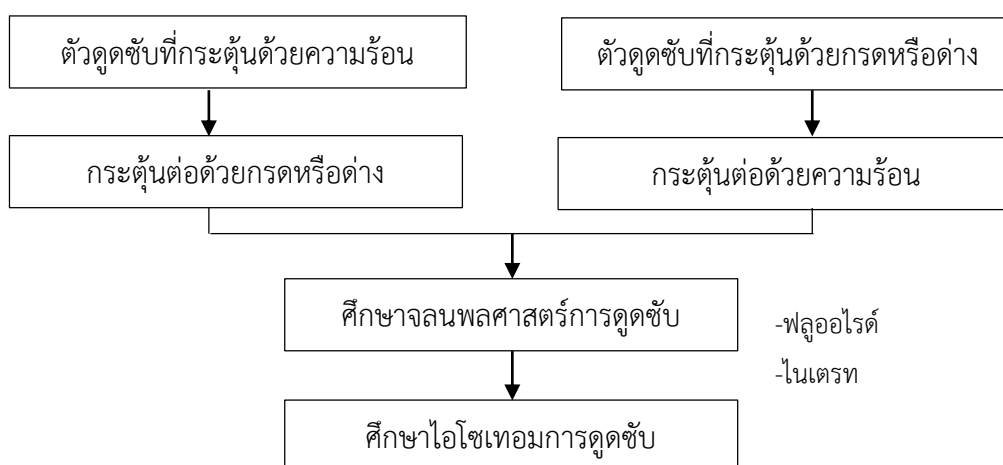
ตัวแปร	พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรต้น	ชนิดของตัวดูดซับ	1. SN 7. SA0.1 2. S300 8. SA0.5 3. S400 9. SA1 4. S500 10. SB0.1 5. S600 11. SB0.5 6. S700 12. SB1
	ชนิดของสารละลาย	1. สารละลายฟลูออไรด์ 2. สารละลายไนเตรท
	เวลาที่ใช้ในการทดลอง	เวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ
	ความเข้มข้นของสารละลายฟลูออไรด์	1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรท	1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นสารละลายฟลูออไรด์ที่เหลือ	-
	ความเข้มข้นสารละลายไนเตรทที่เหลือ	-
ตัวแปรควบคุม	ชนิดของตัวดูดซับ	ตะกอนน้ำประปา จากบริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด
	ขนาดของตัวดูดซับ	1.68 - 2.38 มิลลิเมตร
	ปริมาณตัวดูดซับ	5 กรัม
	ปริมาณสารละลาย	50 มิลลิลิตร
	ความเข้มข้นของสารละลายฟลูออไรด์	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรท	50 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ความเร็วรอบในการปั่นกวน	50 รอบต่อนาที
	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบตัวดูดซับ	103±2 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	25±2 องศาเซลเซียส	

3.5.3 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีร่วมกัน

จากการศึกษาของ Coetzee และคณะ (2003) ได้นำตัวอย่างดินมาทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ โดยวิธีแรก คือ การเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง วิธีที่ 2 คือ กระตุ้นด้วยสารละลาย 1% โซเดียมคาร์บอเนตแล้วตามด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง ไม่เผา และวิธีที่ 3 คือ การเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยสารละลาย 1% โซเดียมคาร์บอเนตแล้วตามด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง พบว่าวิธีที่ 3 มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ดีที่สุด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพิ่มถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยวของตัวดูดซับจากตะกอนโดยวิธีเพิ่มประสิทธิภาพทั้งวิธีทางกายภาพ คือ การเผา และวิธีทางเคมี คือ การใช้กรดหรือด่าง โดยเลือกจากการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับแต่ละแบบที่ผ่านมา ทำการเลือกอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดหรือด่างที่ใช้กระตุ้นตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดมาศึกษาต่อในหัวข้อนี้ โดยกระตุ้นตัวดูดซับทั้ง 2 วิธี ดังนี้

- นำตัวดูดซับไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่เลือก และตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดหรือด่างที่ความเข้มข้นที่เลือก
- นำตัวดูดซับไปกระตุ้นด้วยกรดหรือด่างที่ความเข้มข้นที่เลือก และตามด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่เลือก



ภาพที่ 3- 5 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับที่กระตุ้นทางกายภาพและเคมีร่วมกัน

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์

1. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชสารละลายเริ่มต้น
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายชั่วโมงที่ 2, 4, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และทำการวัดพีเอชหลังเก็บตัวอย่าง
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography
7. ทำการทดลองซ้ำและเปลี่ยนตัวดูดซับ

2. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

1. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชสารละลายเริ่มต้น
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และวัดพีเอชสารละลาย
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกตะกอนดูดซับออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับ

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรท

1. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชสารละลายเริ่มต้น
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายชั่วโมงที่ 2, 4, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และทำการวัดพีเอชหลังเก็บตัวอย่าง
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง Ion Chromatography
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับ

4. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท

1. เตรียมสารละลายไนเตรทความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. นำตัวดูดซับ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และวัดพีเอชสารละลาย
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย
6. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง Ion Chromatography
7. ทำการทดลองซ้ำและเปลี่ยนตัวดูดซับ

3.5.4 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะได้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทที่ดีที่สุด นำตัวดูดซับนั้นมาศึกษาต่อในหัวข้อนี้

1. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแต่ละขวดมีสารละลายไนเตรทความเข้มข้นเท่ากับ ความเข้มข้นฟลูออไรด์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายไนเตรทความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแต่ละขวดมีสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ ความเข้มข้นไนเตรท ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

3. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
4. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
5. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ
6. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย
7. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography และทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับในน้ำมลสารเดียว

3.6 การศึกษาผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับ

3.6.1 ศึกษาผลของคาร์บอเนตไอออน

1. เตรียมสารละลายคาร์บอเนตจากโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายโซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮดรัส (Na_2CO_3) หนัก 0.8833 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็นคาร์บอเนตไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็นคาร์บอเนตไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
4. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
5. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

8. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

3.6.2 ศึกษาผลของไบคาร์บอเนต

1. เตรียมสารละลายไบคาร์บอเนตจากโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตแอนไฮดรัส (NaHCO_3) หนัก 0.6886 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็นไบคาร์บอเนตไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็นไบคาร์บอเนตไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
4. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
5. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
8. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

3.6.3 การศึกษาผลของซัลเฟตไอออน

1. เตรียมสารละลายซัลเฟตไอออนจากโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) หนัก 0.7398 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น ซัลเฟตไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น ซัลเฟตไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
4. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
5. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
8. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

3.6.4 การศึกษาผลของคลอไรด์

1. เตรียมสารละลายคลอไรด์ไอออนจากโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หนัก 0.8231 กรัม ด้วย น้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น คลอไรด์ไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น คลอไรด์ไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500

มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร

4. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
5. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
8. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography และทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับในน้ำมลสารเดียว

3.6.5 การศึกษาผลของโซเดียมไอออน

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไอออนจากโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หนัก 1.2704 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น โซเดียมไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น โซเดียมไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
4. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
5. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

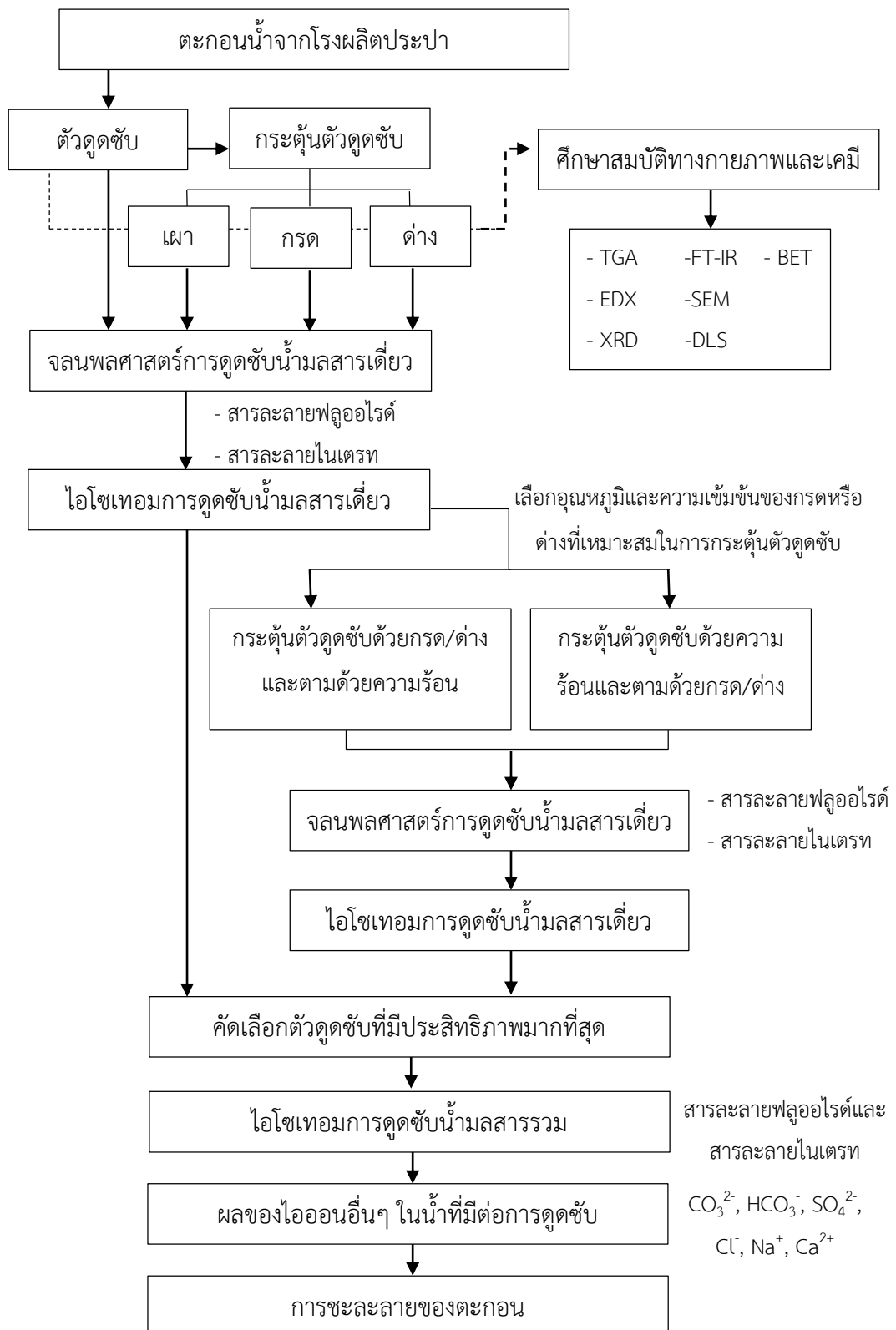
8. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

3.6.6 การศึกษาผลของแคลเซียมไอออน

1. เตรียมสารละลายแคลเซียมไอออนจากแคลเซียมคลอไรด์ไฮเดรต ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายแคลเซียมคลอไรด์ไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หนัก 1.8378 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
2. เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น แคลเซียมไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายไนเตรท ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีไอออนรบกวนเป็น แคลเซียมไอออนความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
4. นำตัวดูดซับมา 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด
5. นำสารละลายไปเขย่าด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที ในห้องอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
8. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

3.7 การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ

1. นำตัวดูดซับแต่ละแบบมา 5 กรัม ใส่ลงในขวดการทดลองที่มีน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. นำขวดการทดลองไปเขย่าที่เวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับของแต่ละตัวดูดซับที่ได้จากการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ
3. กรองตัวดูดซับออกจากสารละลาย
4. นำสารละลายหลังการเขย่าไปทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำเบื้องต้น
5. เปรียบเทียบคุณภาพน้ำก่อนและหลังใช้ตัวดูดซับเพื่อดูการชะละลายของไอออนต่างๆ ในตัวดูดซับหลังการใช้งาน



ภาพที่ 3- 6 สรุปรูปขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

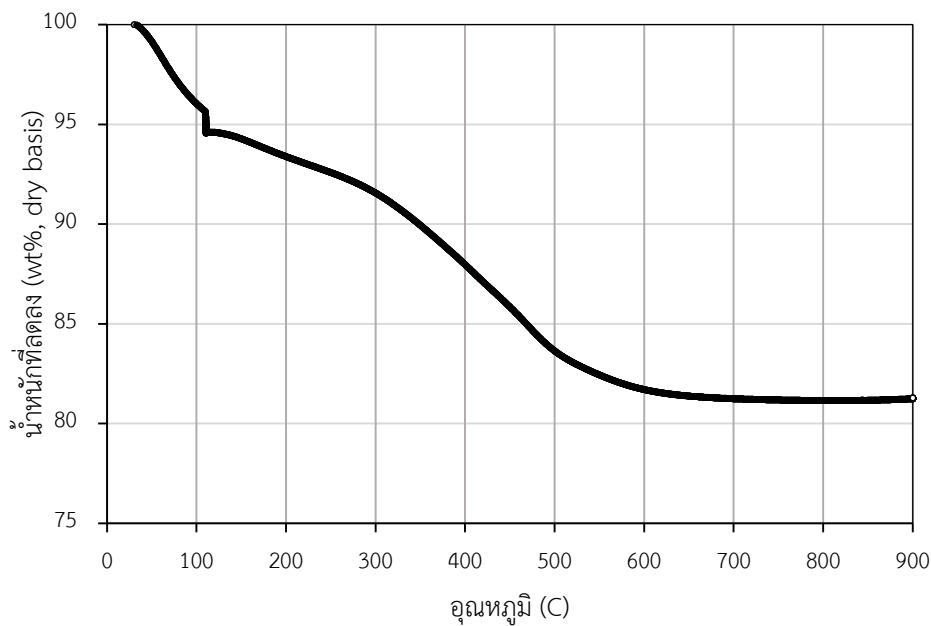
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

4.1.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนของตัวดูดซับ

โครงสร้างทางเคมีของตะกอนจะมีน้ำและสารต่างๆ เป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อตะกอนผ่านความร้อนที่อุณหภูมิหนึ่ง สารประกอบเหล่านี้จะแตกตัวออกจากโครงสร้างทางเคมีเป็นก๊าซ จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนของตะกอนด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะของก๊าซออกซิเจนตั้งแต่อุณหภูมิ 30-900 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงผลดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4- 1 ผลการวิเคราะห์ TGA ของตัวดูดซับ SN

ตัวดูดซับ SN เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตะกอนอยู่สองช่วงอุณหภูมิ ช่วงแรกอุณหภูมิประมาณ 30-100 องศาเซลเซียส ตะกอนเกิดการสูญเสียน้ำหนักไปประมาณ 5.73% ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำ (Dehydration) ภายในตะกอน แม้ว่าจะทำการอบตะกอนที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียสก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์แล้วก็ตามแต่ยังมีน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างตะกอนที่ยังระเหย

ออกไม่หมด จึงมีการระเหยออกไปในช่วงอุณหภูมินี้ ทำให้น้ำหนักตะกอนลดลงเล็กน้อย และช่วงที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส ตะกอนเกิดการสูญเสียน้ำหนักไปประมาณ 8.44-18.30% โดยอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตะกอนมากที่สุด เท่ากับ 4.91% และหลังจาก 600 องศาเซลเซียสน้ำหนักของตะกอนเริ่มคงที่ โดยช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส น้ำหนักตะกอนเปลี่ยนแปลง 0.56% ซึ่งอุณหภูมิมิผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตะกอน เนื่องจากการเผาไหม้มลทิน (Oxidation Period) รวมทั้งเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในตะกอน สารประกอบต่างๆ จะแตกตัวออกจากโครงสร้างทางเคมีไปเป็นก๊าซ และช่วงนี้ตะกอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ตะกอนเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดง น้ำหนักลดลง เป็นต้น และเมื่อสารอินทรีย์สลายตัวไปทำให้ความพรุนตัวของตะกอนเพิ่มขึ้น

ดังนั้นสำหรับตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นจะเลือกใช้ตัวดูดซับ S500, SA1 และ SB1 เป็นตัวแทนของตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อน กรดและด่าง ตามลำดับ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตะกอนมาก และเป็นความเข้มข้นของกรดและด่างมากที่สุดจึงน่าจะเห็นลักษณะทางกายภาพและเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของตะกอนมากที่สุด ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่นๆ ของตัวดูดซับในหัวข้อต่อไป

4.1.2 ผลการศึกษาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอน

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุในตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1 ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ได้ผลดังตารางที่ 4-1 โดยรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ก.1 พบว่าตะกอนมีปริมาณแร่ธาตุต่างๆ อยู่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นตะกอนที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบธาตุโซเดียมอยู่ประมาณ 2.22% โดยส่วนใหญ่ปริมาณของแร่ธาตุที่มีในตะกอนเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $O > Si > Al > Fe > Mn > S > K > Ca$ ซึ่งปริมาณอะลูมิเนียมลดลงเล็กน้อย จาก 18.12% เหลือ 16.45% เมื่อทำการกระตุ้นตะกอนด้วยการเผา และปริมาณแมงกานีสลดลงจาก 4.03% เหลือ 0.23%, 0.28% และ 0.44% เมื่อกระตุ้นตะกอนด้วยการเผา กรด และด่าง ตามลำดับ เนื่องจากการเผาตะกอนจะกำจัดแมงกานีสออกไป และการกระตุ้นตะกอนด้วยกรดและด่าง ทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และโซเดียมไอออน (Na^+) ในสารละลายซึ่งมี

ขนาดไอออนเล็กมากสามารถเข้าไปแทนที่แมงกานีสไอออนที่มีอยู่ในโครงสร้างของตะกอนได้ (Michale และ Donald, 1992)

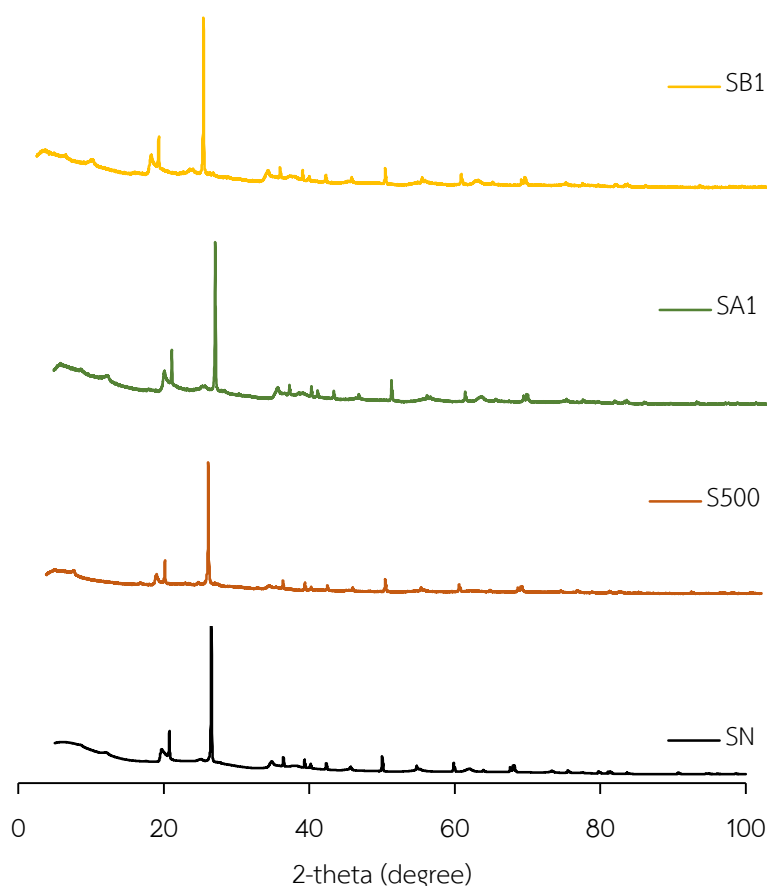
ตารางที่ 4- 1 ปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตะกอน

ชนิดของแร่ธาตุ	ปริมาณแร่ธาตุในตะกอน (Wt%)			
	SN	S500	SA1	SB1
O	46.12	43.39	40.23	39.51
Mg	0.39	0.67	0.54	0.41
Al	18.12	16.45	18.26	17.80
Si	21.11	26.00	26.99	22.65
S	2.20	1.51	1.37	1.53
Cl	0.41	0.15	0.32	0.30
K	1.03	1.68	1.54	1.17
Ca	0.76	0.48	0.34	1.20
Ti	0.28	0.25	-	0.19
Mn	4.03	0.23	0.28	0.44
Fe	5.69	7.34	8.22	7.51
Na	-	-	-	2.22

4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1 โดยใช้ X-Ray Powder Diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนในช่วงมุม (2-theta) 1 ถึง 100 องศา แสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Intensity และค่า 2-theta พบว่าเมื่อกระตุ้นตัวดูดซับไม่ทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับปรากฏพีก (Peak) ขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งประมาณ 20.76°, 26.54°, 36.45°, 39.36°, 40.19°, 42.35°, 45.69°, 55.16° และ 81.06° ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพีกที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างผลึกออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดย

สารประกอบที่พบจะอยู่ในรูปของ Quartz alpha ($\alpha\text{-SiO}_2$) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุที่ได้จากเครื่อง EDX ที่พบปริมาณธาตุซิลิกาและอะลูมินามาก โดยผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4-2

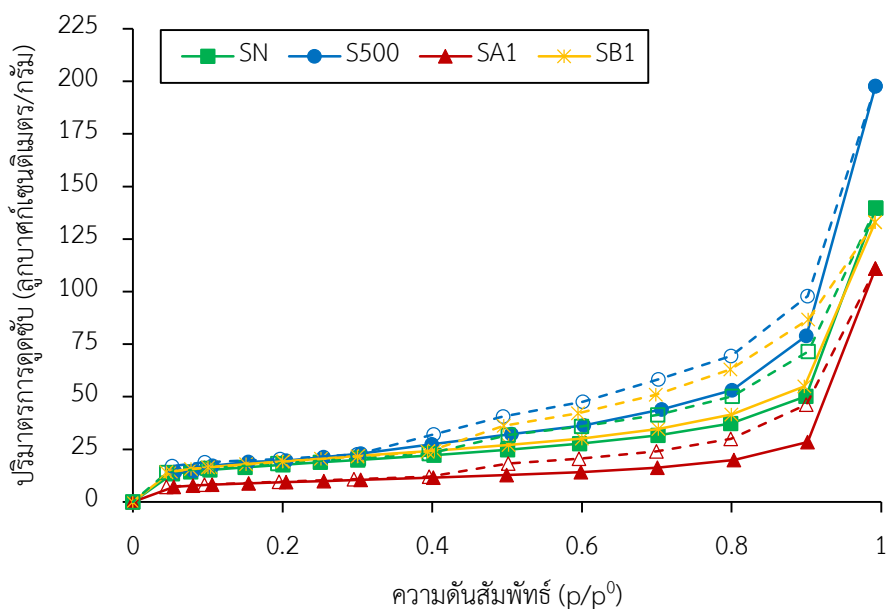


ภาพที่ 4- 2 ผลการวิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบในตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และSB1 ด้วยเครื่อง XRD

4.1.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับไนโตรเจน ที่สภาวะอุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน ซึ่งสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะคือ สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ผลการวิเคราะห์การดูดซับไนโตรเจนดังภาพที่ 4-3 โดยพบว่าปริมาณการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นหลังนำตะกอนไปกระตุ้นด้วยความร้อน เป็นผลมาจากขนาดรูพรุนที่เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณการดูดซับก๊าซไนโตรเจนลดลง

หลังนำตะกอนไปกระตุ้นด้วยกรด เนื่องจากพื้นที่ผิวลดลง และปริมาณการดูดซับไนโตรเจนไม่แตกต่างจากเดิมมากหลังนำตะกอนไปกระตุ้นด้วยต่าง



ภาพที่ 4- 3 ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1

เมื่อสัญลักษณ์เส้นทึบ คือ การดูดซับ และสัญลักษณ์เส้นประ คือ การคายซับ

การวิเคราะห์ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้สมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4-2 โดยพบว่าตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 13.7, 89.5, 13.9 และ 13.7 อังสตรอม ตามลำดับ ซึ่งตัวดูดซับ S500 มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตะกอนที่ไม่ได้กระตุ้นมาก เนื่องจากภายหลังการเผามีการระเหยของน้ำและทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ในโครงสร้างตะกอนเกิดการสลายตัวไปทำให้มีรูพรุนเป็นจำนวนมากและส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ส่วนขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ SA1 และ SB1 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นพบว่าไม่แตกต่างกันมาก และตัวดูดซับ SA1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปซึ่งอาจไปทำลายโครงสร้างของตัวดูดซับจึงทำให้มีพื้นที่ผิวลดลง (Bekele และคณะ, 2014) จะเห็นว่าตะกอนมีพื้นที่ผิวค่อนข้างต่ำ แสดงว่าตะกอนมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด และมีชั้นโครงสร้างที่ขยายตัว

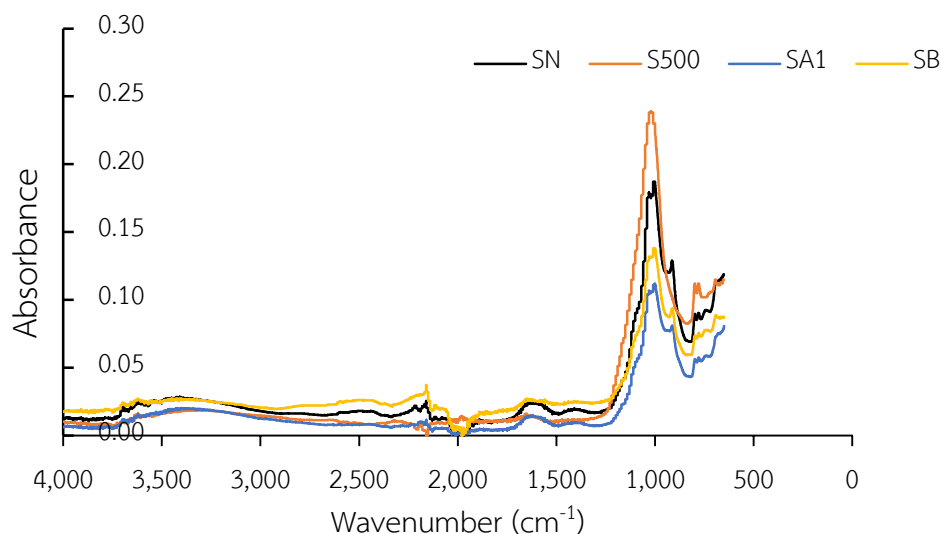
จากภาพ 4-3 แสดง BET Isotherm ของตัวดูดซับแต่ละแบบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชนิดของไอโซเทอมของ Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) classification (Gregg และ Sing, 1982) จะพบว่าลักษณะของไอโซเทอมของตัวดูดซับต่างๆ นั้นใกล้เคียงกับไอโซเทอมชนิดที่ 3 ซึ่งแสดงว่าการดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และแบบหลายชั้น (multilayer) แต่ส่วนใหญ่แล้วโดยทั่วไปจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จากตารางที่ 4-2 เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ พบว่าดินเบนโทไนต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 55.18 ตารางเมตรต่อกรัม (รุจิราไทยเอียด, 2546) ซึ่งมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่ไม่กระตุ้น และกระตุ้นด้วยกรดมีขนาดรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) คือมีขนาดน้อยกว่า 20 อังสตรอม ส่วนตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนมีขนาดรูพรุนขนาดปานกลาง (mesopore) คือ อยู่ในช่วง 20-500 อังสตรอม

ตารางที่ 4- 2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
SN	62.132	13.730	0.213
S500	39.933	89.494	0.303
SA1	32.435	13.872	0.170
SB1	67.813	13.681	0.203

4.1.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1 ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-4

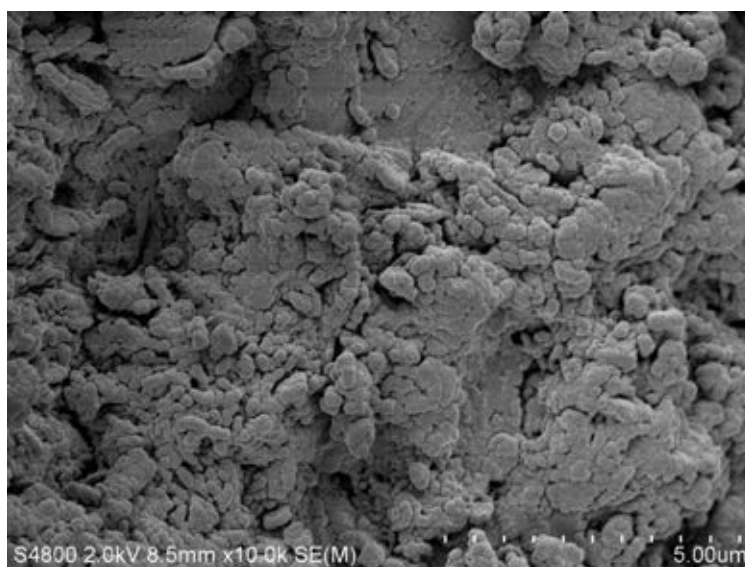


ภาพที่ 4- 4 สเปกตรัม FT-IR ของตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1

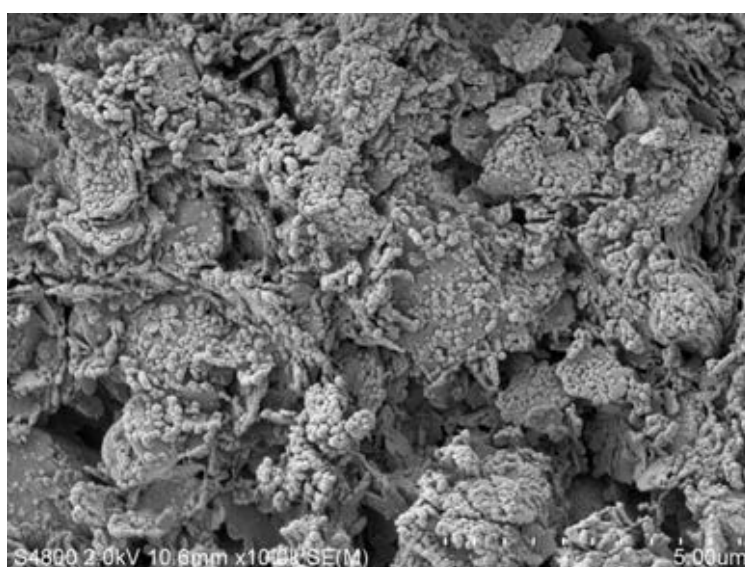
ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน โดยหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏจากการวิเคราะห์มีดังนี้ ที่ความยาวคลื่น 3400 cm^{-1} แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ของหมู่ซิลอกเซน (Si-OH) และโมเลกุลของน้ำรวมกัน ซึ่งโมเลกุลของน้ำอย่างเดียวยังพบได้ที่ช่วงคลื่น 1630 cm^{-1} และแสดงถึง Al-OH (Bekele และคณะ, 2014; Gulnaz และคณะ, 2006) ที่ช่วงคลื่น 2260-2100 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของอัลไคน์ (Alkynes) หรือ C≡C stretching และที่ช่วงคลื่น 1100-1000 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ซิลินอล (Si-O₂) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุที่มีลักษณะแบบดินเหนียว และเป็นหมู่ฟังก์ชันที่คลื่นอินฟราเรดตรวจพบมากที่สุด ซึ่งมีสมบัติในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับได้ดี และช่วงคลื่น 912 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลของ AlAlOH (Bekele และคณะ, 2014) จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR บนพื้นผิวของตัวดูดซับจากตะกอนน้ำเปรียบเทียบกับตัวดูดซับจากตะกอนที่กระตุ้นแล้วพบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนไม่พบช่วงคลื่น 2161 และ 1630 cm^{-1} เนื่องจากการเผาตะกอนทำให้น้ำและสารอินทรีย์ระเหยไป และพบช่วงคลื่นที่ลดลงเหลือช่วงคลื่น 778 cm^{-1} เนื่องจากการลดลงของ Al ส่วนตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรด พบว่าที่ช่วงคลื่น 3406 cm^{-1} ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการกำจัดไอออนบวกในช่องว่างของตะกอน ทำให้เกิดการสูญเสียและหมู่ไฮดรอกซิลไป

4.1.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ

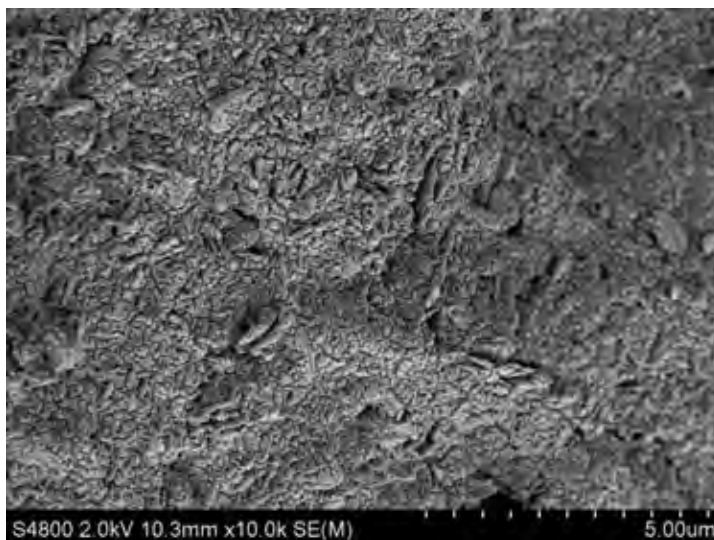
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับแต่ละแบบ ซึ่งเปรียบเทียบลักษณะระหว่างตัวดูดซับ SN, S500, SA1 และ SB1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-5 ถึง 4-8 พบว่าลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ S500 รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abo-El-Enein (2017) พบว่าการเผาตะกอนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้รูพรุนที่พื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้น



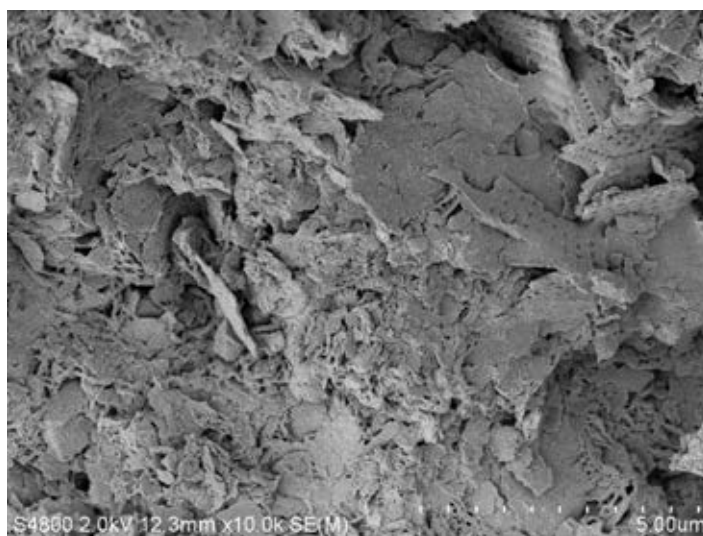
ภาพที่ 4- 5 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ SN ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



ภาพที่ 4- 6 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ S500 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



ภาพที่ 4- 7 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูด SA1 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

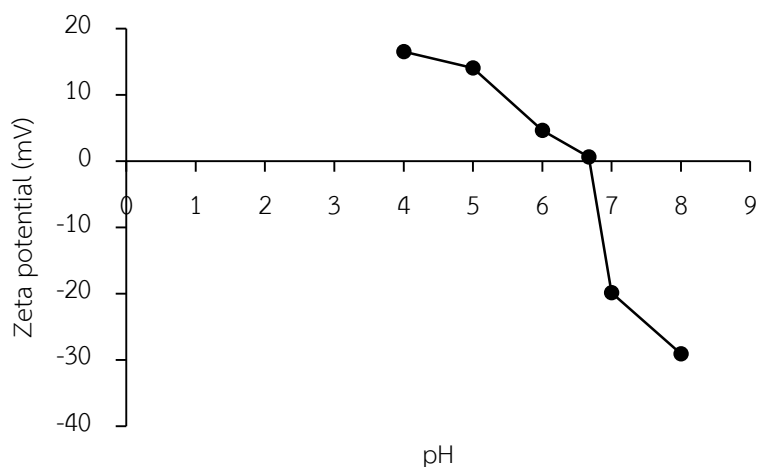


ภาพที่ 4- 8 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ SB1 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.1.7 ผลการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว

การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว เลือกใช้ตัวดูดซับ S500 เป็นตัวแทนในการศึกษาประจุบนพื้นผิว สภาพประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Surface charge) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dynamic light scattering (DLS) เป็นเทคนิควัดการกระเพื่อมของความเข้มแสง โดยเป็นการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ออกมา ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของประจุบน

พื้นผิวกับค่า pH ดังภาพที่ 4-9 จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับ S500 มีค่า pH_{zpc} เท่ากับ 6.8 ซึ่งถ้าสารละลายมีค่า pH น้อยกว่า pH_{zpc} ส่งผลให้เกิดประจุบวกบนพื้นผิวดูดซับขึ้น



ภาพที่ 4- 9 ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500

4.2 ผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอน

4.2.1 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำมลสารเดี่ยว

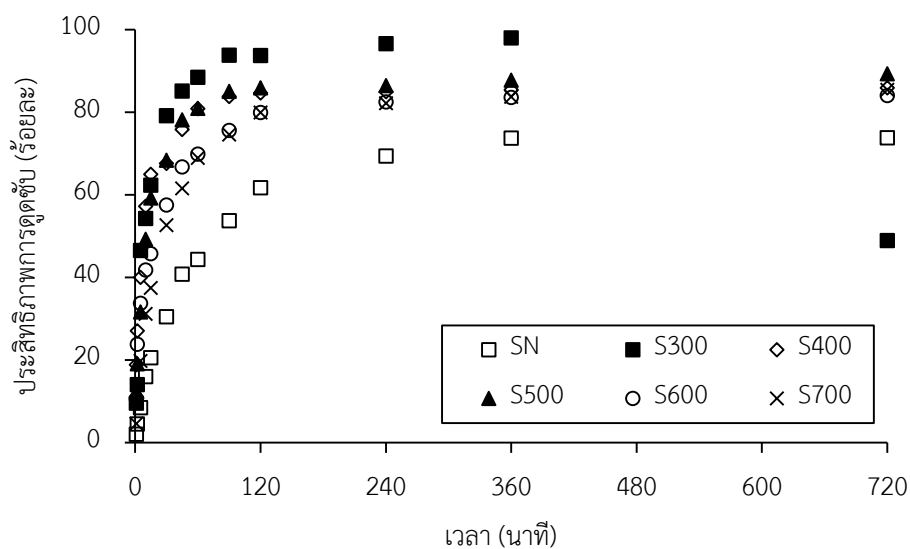
4.2.1.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับแต่ละแบบ ทำการทดลองในระบบที่ละเท โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟลูออไรด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความเข้มข้นคงที่ได้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับและนำเวลาที่ได้ไปใช้ในการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับต่อไป

1) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

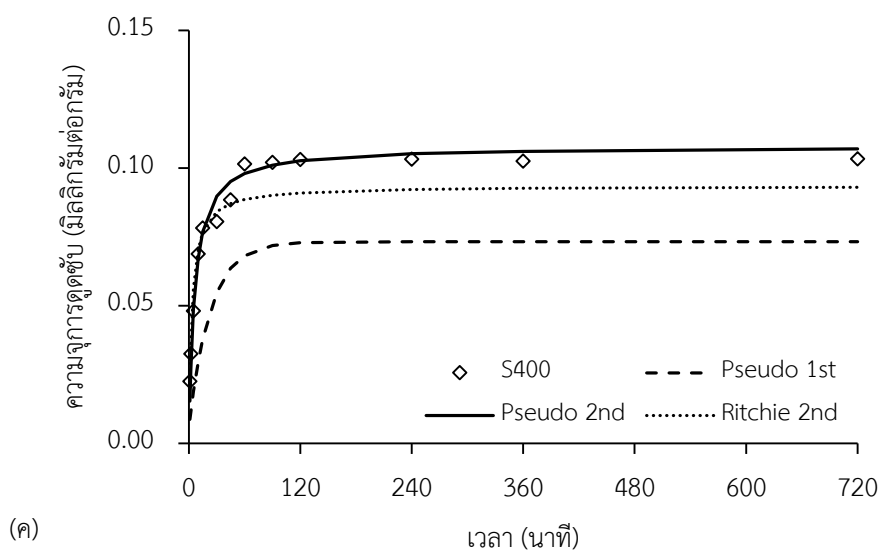
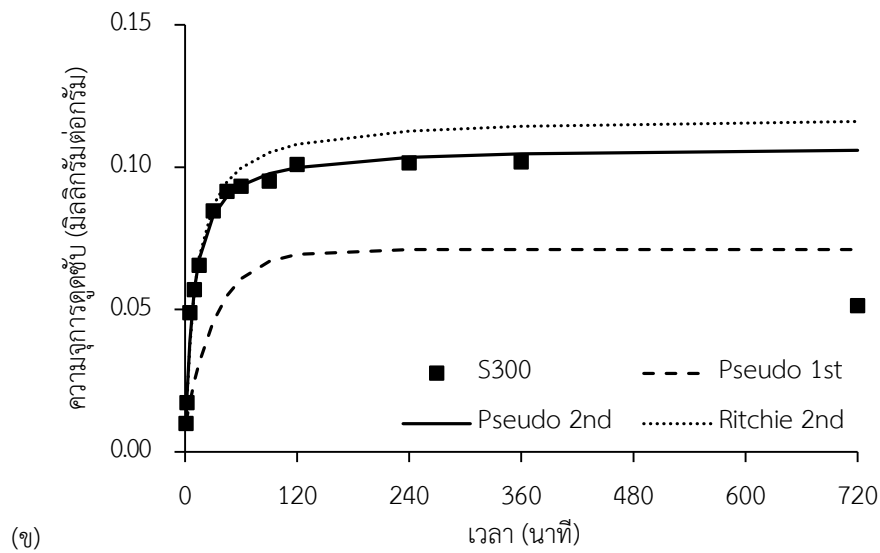
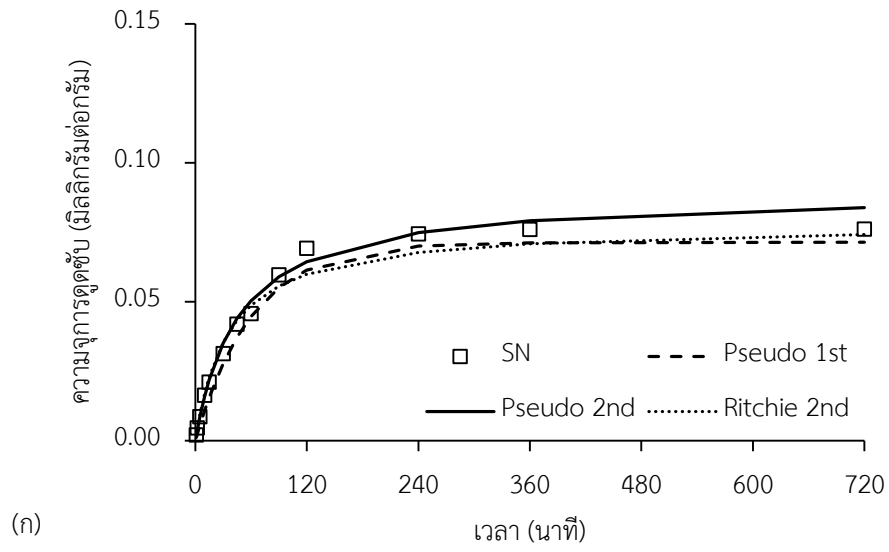
จากผลการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและเวลาตามภาพที่ 4-10 ซึ่งจากการเปรียบเทียบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับ SN, S300, S400, S500, S600 และ S700 พบว่าตะกอนสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ โดยตะกอนที่ไม่ได้กระตุ้นใช้เวลาประมาณ

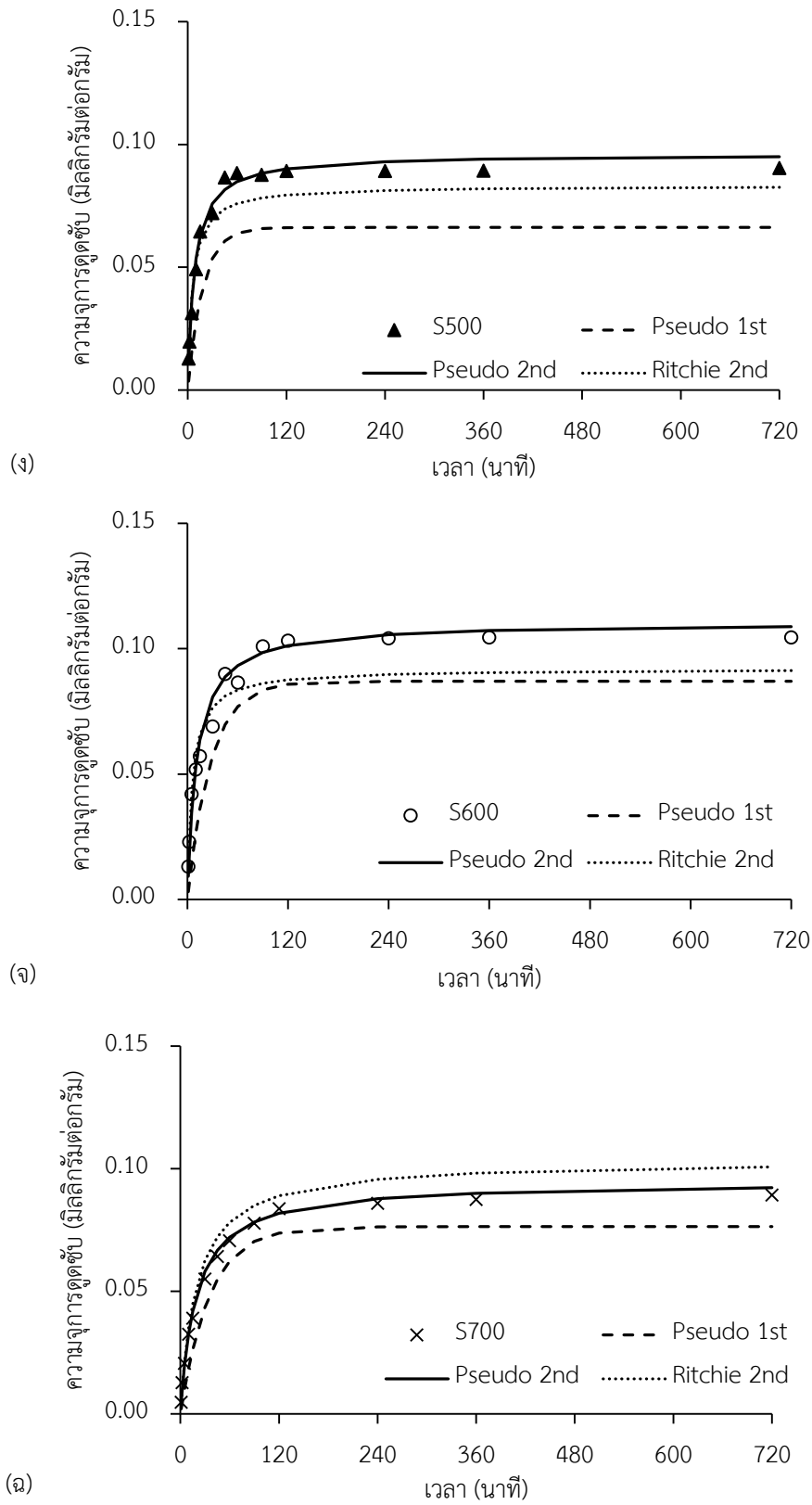
6 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ส่วนตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าตะกอนที่ไม่ได้กระตุ้น โดยใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ซึ่งตัวดูดซับ SN และ S300 มีการแตกออกของตะกอน ทำให้สารละลายมีปริมาณฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น อีกทั้งตะกอน S300 และ S400 มีการแตกออกมาหลังจาก 12 ชั่วโมง และสารอินทรีย์อาจจะถูกเผาไหม้ไม่มากนักทำให้สารละลายที่ได้มีความขุ่น ดังนั้นตัวดูดซับ SN, S300 และ S400 อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ส่วนตัวดูดซับ S500, S600 และ S700 การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อเวลา 240 นาที การที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนเร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น เนื่องจากตัวดูดซับที่เผาแล้วมีขนาดรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น ส่งผลให้ฟลูออไรด์ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้เร็วและมากกว่า และตัวดูดซับมีความคงรูป ไม่แตกออกมาในสารละลาย



ภาพที่ 4- 10 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

จากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน และสมการอันดับสองเหมือนของ Ritchie ดังภาพที่ 4-11 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4-3 โดยที่ค่าความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มาก ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์การดูดซับเป็นไปตามสมการอันดับสองเหมือน เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า





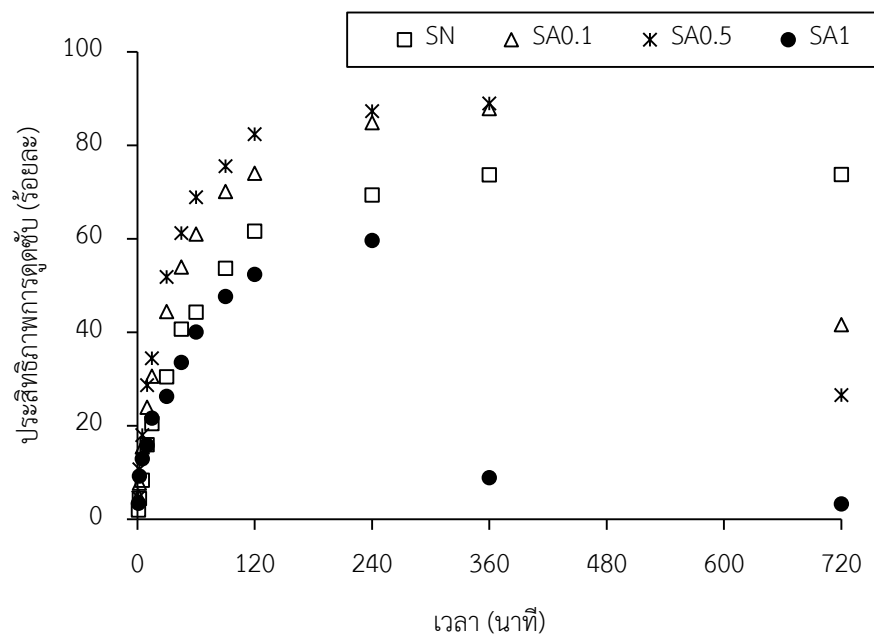
ภาพที่ 4- 11 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) S300 (ค) S400 (ง) S500 (จ) S600 (ฉ) S700

ตารางที่ 4- 3 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยควมร้อน

ตัวดูดซับ	q (ทดลอง) (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order			Ritchie Second Order		
		R ²	K ₁ (นาที ⁻¹)	q _e (มก./ก.)	R ²	K ₂ (ก./มก.·น.)	q _e (มก./ก.)	R ²	K _r (ล./น.)	q _e (มก./ก.)
SN	0.0759	0.9804	0.0121	0.0659	0.9956	0.2786	0.0838	0.9953	0.0276	0.0787
S300	0.1016	0.9349	0.0300	0.0711	0.9985	1.0632	0.1072	0.9929	0.0924	0.1178
S400	0.1033	0.9626	0.0496	0.0733	0.9970	1.5362	0.1079	0.9797	0.3034	0.0935
S500	0.0893	0.9316	0.0549	0.0662	0.9978	1.3052	0.0961	0.9832	0.1727	0.0832
S600	0.1042	0.9764	0.0359	0.0870	0.9911	0.8192	0.1105	0.9904	0.1660	0.0920
S700	0.0858	0.9874	0.0281	0.0764	0.9954	0.5583	0.0947	0.9749	0.0513	0.1035

2) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

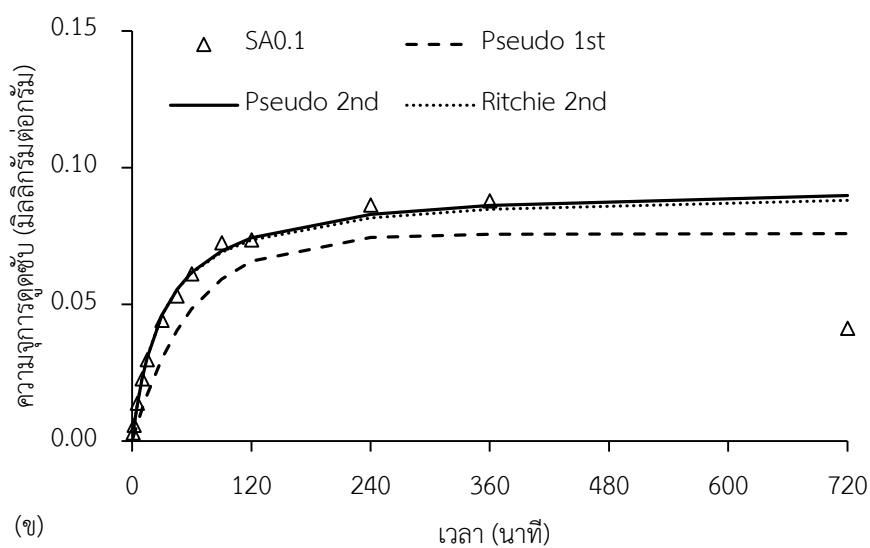
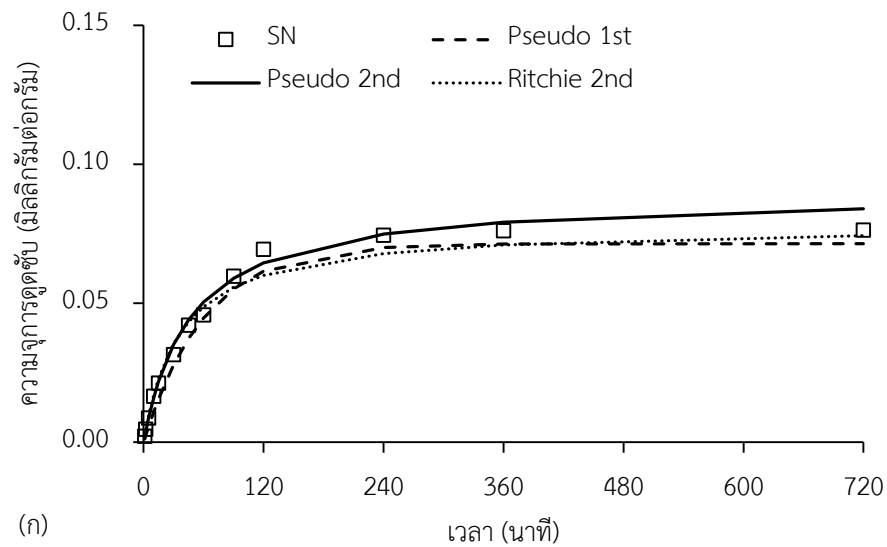
จากการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและเวลาตามภาพที่ 4-12 เมื่อเปรียบเทียบความจุในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับ SN, SA0.1, SA0.5 และ SA1 พบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปตัวดูดซับ SA1 แดกออก เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปอาจไปทำลายโครงสร้างของตะกอน ทำให้ไม่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับ SA0.1 และ SA0.5 เข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่กระตุ้น ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่ที่เวลา 240 นาที การที่ตัวดูดซับที่กระตุ้นกรดเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น เนื่องจากการกระตุ้นกรดไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเข้าไปจับในโครงสร้างของตัวดูดซับทำให้ตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะเป็นประจุบวกได้มากขึ้น และเมื่อเขย่าต่อไป พบว่าตัวดูดซับมีการแตกออก เนื่องจากตัวดูดซับยังไม่คงรูป ทำให้ค่าฟลูออไรด์ในน้ำเพิ่มขึ้น

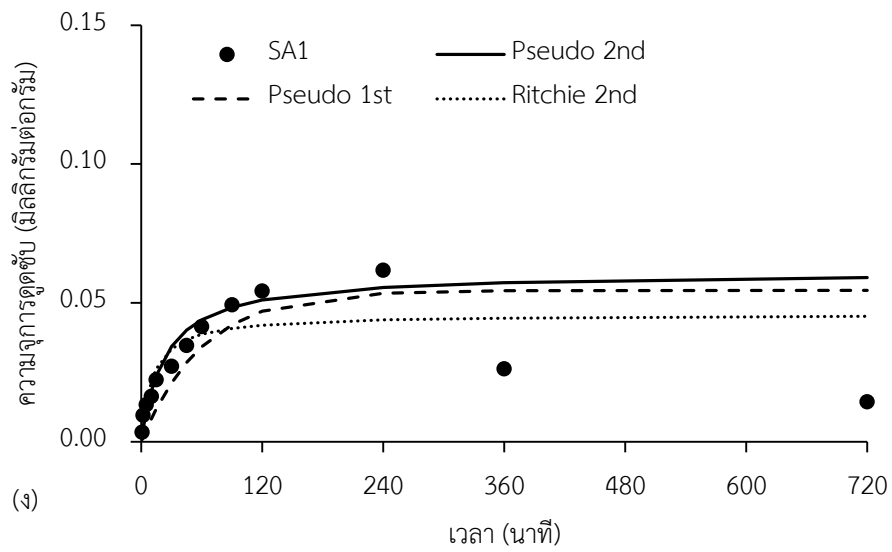
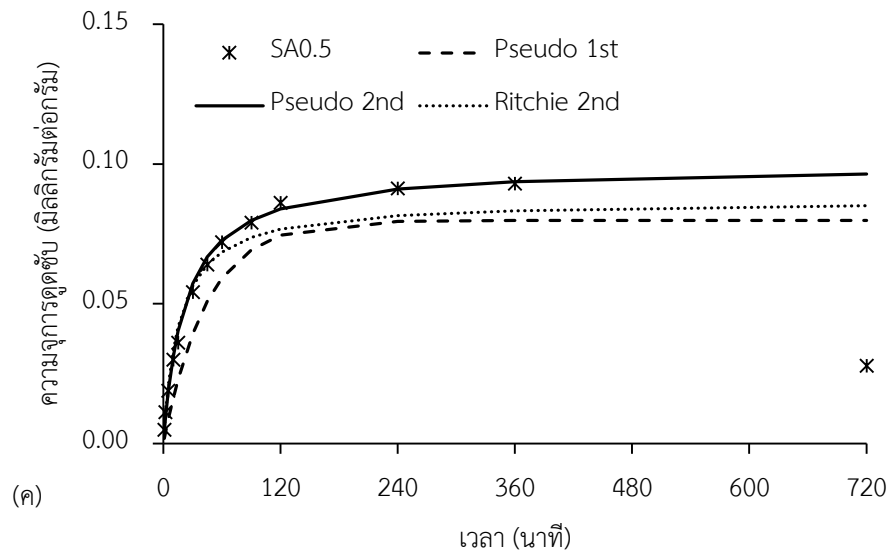


ภาพที่ 4- 12 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

ตัวดูดซับ SA0.1 และ SA0.5 ทำให้สารละลายที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเท่ากับ 6.5-6.6 และ 6.3-6.5 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายหลังใช้ตัว

ดูดซับ SA0.5 สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน และจากข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง เสมือน สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน และสมการอันดับสองเสมือนของ Ritchie ดังภาพที่ 4-13 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4-4 โดยความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มาก ซึ่งพบว่าการดูดซับเป็นไปตามสมการอันดับสองเสมือน เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า ยกเว้น SA1





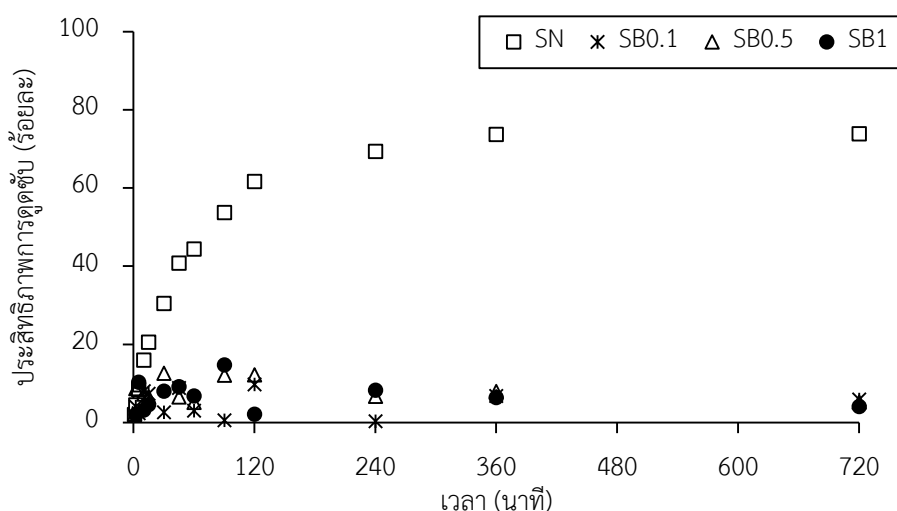
ภาพที่ 4- 13 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 (ค) SA0.5 (ง) SA1

ตารางที่ 4- 4 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้มด้วยกรด

ตัวดูดซับ	q (ทดลอง) (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order			Ritchie Second Order		
		R ²	K ₁ (นาที ⁻¹)	q _e (มก./ก.)	R ²	K ₂ (ก./มก.*น.)	q _e (มก./ก.)	R ²	K _r (ล./น.)	q _e (มก./ก.)
SN	0.0759	0.9804	0.0121	0.0659	0.9956	0.2786	0.0838	0.9953	0.0276	0.0787
SA0.1	0.0863	0.9698	0.0169	0.0758	0.9909	0.3435	0.0937	0.9615	0.0338	0.0917
SA0.5	0.0913	0.9548	0.0270	0.0867	0.9909	0.4274	0.1017	0.9888	0.0586	0.0892
SA1	0.0618	0.9956	0.0165	0.0545	0.9577	0.7038	0.0610	0.9615	0.0893	0.0460

3) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยต่าง

จากผลการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและเวลาดังภาพที่ 4-14 ซึ่งพบว่าตัวดูดซับ SN, SB0.1, SB0.5 และ SAB1 ไม่สามารถดูดซับฟลูออไรด์ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยต่างทำให้สารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้น โดยค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7-8 ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีโปรตอนเนต (deprotonation) ทำให้พื้นที่ผิวแสดงประจุลบ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ใช้วัสดุประเภทดินเป็นตัวดูดซับ เช่น การทดลองของ Karthikeyan และคณะ (2005) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ของดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ลดลง เมื่อพีเอชในสารละลายมากกว่า 7 เนื่องจากเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงผลักของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับกับไอออนของฟลูออไรด์ และการทดลองของ Tor และคณะ (2009) พบว่าการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยโคลนแดงมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อค่าพีเอชในสารละลายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4- 14 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยต่าง

ดังนั้นจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์จะเห็นว่า การกระตุ้นตัวดูดซับทำให้การดูดซับฟลูออไรด์เข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วขึ้น โดยฟลูออไรด์สามารถเข้าไปยึดเกาะในบริเวณพื้นผิวดูดซับได้ง่ายขึ้น สำหรับในการศึกษานี้สามารถสรุปสภาวะคงที่ของการดูดซับ (Equilibrium adsorption) อัตราเร็ว และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่กับการดูดซับฟลูออไรด์ได้ดังตารางที่ 4-5 โดยตัวดูดซับที่กระตุ้นเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเหมือน ซึ่งแสดงว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณฟลูออไรด์และพื้นที่ดูดซับ

ตารางที่ 4- 5 สรุปเวลาในการเข้าสู่สมดุลง และแบบจำลองจลนพลศาสตร์

ตัวดูดซับ		เวลาในการเข้าสู่สมดุลง	แบบจำลองจลนพลศาสตร์	ตัวดูดซับและสารละลาย
ตะกอนที่ไม่ได้กระตุ้น		6 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	แตกและสารละลายชุ่น
ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อน	S300	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	แตกและสารละลายชุ่น
	S400	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	สารละลายชุ่น
	S500	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	S600	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	S600	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
ตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรด	SA0.1	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	SA0.5	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	SA1	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน	แตกและสารละลายชุ่น
ตะกอนที่กระตุ้นด้วยต่าง	SB0.1	-	-	ไม่ดูดซับ
	SB0.5	-	-	ไม่ดูดซับ
	SB1	-	-	ไม่ดูดซับ

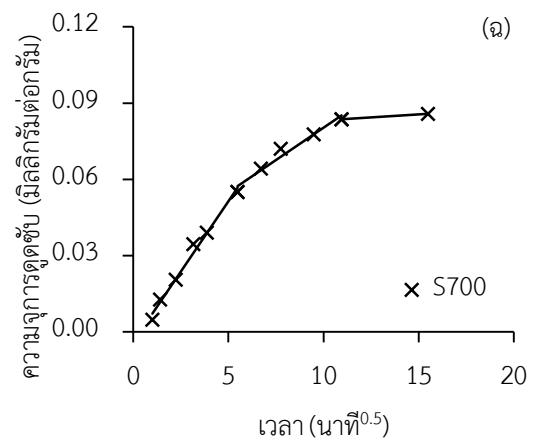
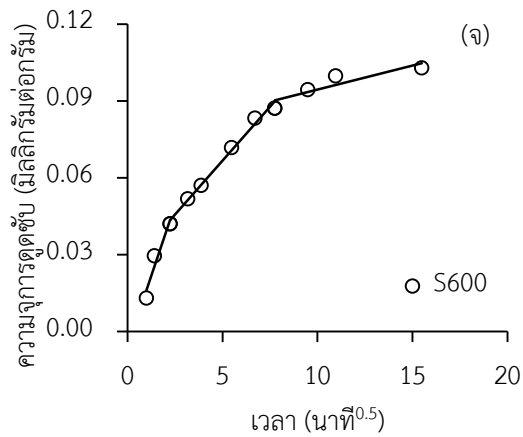
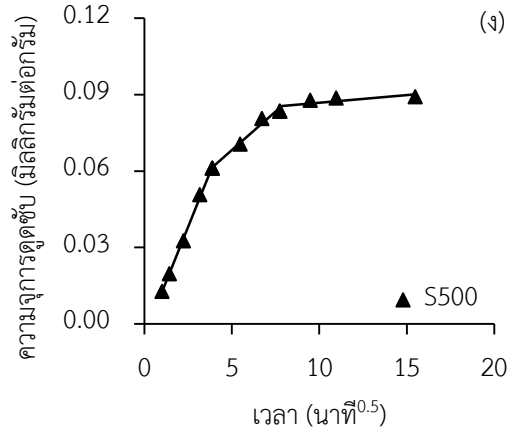
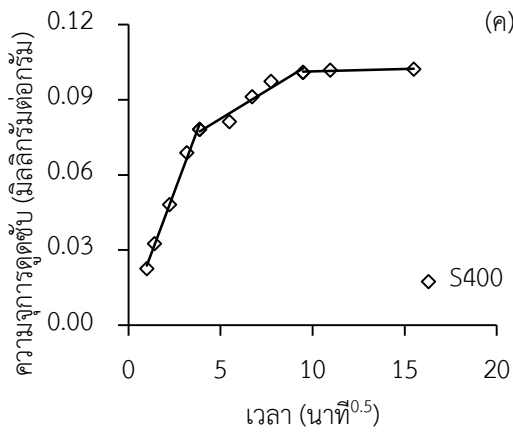
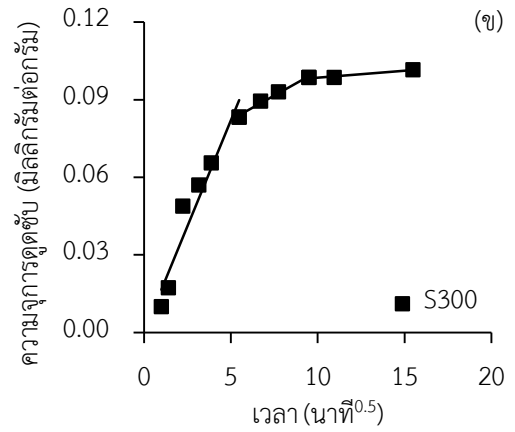
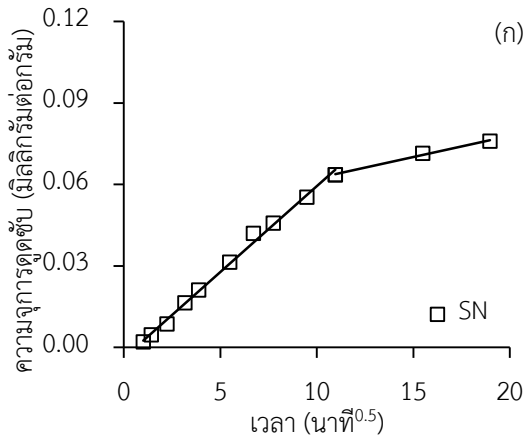
4.2.1.2 การศึกษากลไกการดูดซับฟลูออไรด์

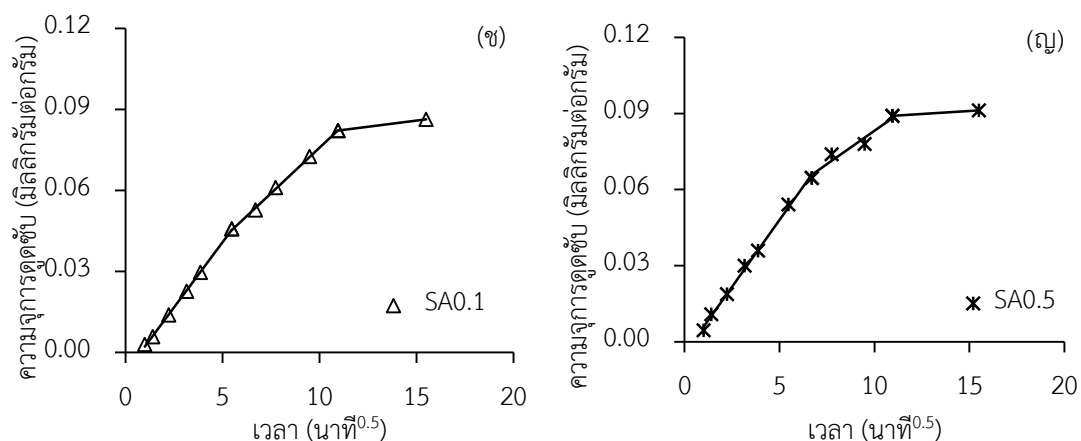
โดยทั่วไปการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสามารถแบ่งช่วงของการดูดซับออกเป็นสามช่วง (Albadarin และคณะ, 2012) ในช่วงที่หนึ่ง เป็นผลของการดูดซับในชั้นแพร่ชั้นฟิล์ม (Film diffusion) ในสารละลายผ่านไปที่ผิวของตัวดูดซับ ส่วนในช่วงที่สอง เกิดจากการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) หรือการแพร่ภายในรูพรุน (Pore diffusion) และในช่วงที่สาม เป็นช่วงที่การดูดซับเท่ากับการคายซับหรือถึงระยะเวลาสมดุลแล้ว โดยการศึกษากลไกการดูดซับฟลูออไรด์ใช้แบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคดังสมการที่ 4-1

$$q_t = k_p t^{0.5} + C \quad (4-1)$$

โดย K_p คือ ค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาค (มิลลิกรัม/กรัม.นาที่^{0.5})

การศึกษาขั้นของการเกิดปฏิกิริยาหาจากช่วงที่การดูดซับยังไม่เข้าสู่สมดุลนั้นว่าช่วงใดมีความชันหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาดำสุด ซึ่งจะเป็นช่วงที่เป็นขั้นกำหนดอัตราของปฏิกิริยา ดังนั้นผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-15 กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างฟลูออไรด์กับตัวดูดซับ SN, S300, S400, S500, S600, S700, SA0.1 และ SA0.5 พบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นเกิดการดูดซับ 3 ชั้น โดยค่าความชันในช่วงที่ 2 ของการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าความชันต่ำกว่าค่าความชันในช่วงแรกหรือมีอัตราการดูดซับต่ำสุด ดังนั้นขั้นของการแพร่ภายในอนุภาคจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ โดยโมเลกุลของฟลูออไรด์จะแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ช้า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yadav และคณะ (2006) ได้ทำการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ผงอิฐและผงถ่านเป็นตัวดูดซับ พบว่าความชันของกราฟช่วงสองมีค่าต่ำกว่าความชันช่วงแรก ดังนั้นขั้นของการแพร่ภายในอนุภาคจึงเป็นขั้นของการกำหนดอัตราการดูดซับทั้งของผงอิฐและผงถ่าน ส่วนตัวดูดซับ SN เกิดการดูดซับเพียง 2 ชั้น เนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่ยังไม่เอื้อต่อการดูดซับฟลูออไรด์ พื้นผิวมีขนาดรูพรุนเล็ก (13.73 อังสตรอม) ทำให้การแพร่เข้าสู่ชั้นของเหลวเกิดขึ้นช้า ส่วนตัวดูดซับ SA1 แดกออกในช่วงเวลาที่มีการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับ จึงไม่ได้นำมาหากลไกการดูดซับ โดยผลวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า K_p แสดงในตารางที่ 4-6





ภาพที่ 4- 15 กลไกการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ

(ก) SN (ข) S300 (ค) S400 (ง) S500 (จ) S600 (ฉ) S700 (ช) SA0.1 และ (ฅ) SA0.5

ตารางที่ 4- 6 ค่าคงที่ของการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค

ตัวดูดซับ	ความชันที่ 1		ความชันที่ 2	
	K_{ip1}	C	K_{ip2}	C
SN	0.0063	-0.0038	-	-
S300	0.0163	0.0002	0.0038	0.0634
S400	0.0196	0.0042	0.0045	0.0601
S500	0.0171	-0.0046	0.0071	0.0380
S600	0.0222	-0.0062	0.0084	0.0246
S700	0.0111	-0.0038	0.0061	0.0296
SA0.1	0.0096	-0.0074	0.0067	0.0084
SA0.5	0.0105	-0.0046	0.0083	0.0305

จากตารางที่ 4-6 พบว่าอัตราการดูดซับ (K) ของตัวดูดซับต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน โดยตัวดูดซับ S600 และ SA0.5 มีอัตราการดูดซับสูงสุดและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากตัวดูดซับจากตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยความร้อนและกรดมีพื้นที่ผิวที่ช่วยในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีขึ้น จึงทำให้ฟลูออไรด์เข้าไปในรูพรุนได้ดีและเร็วกว่า ทำให้อัตราการดูดซับมากขึ้น

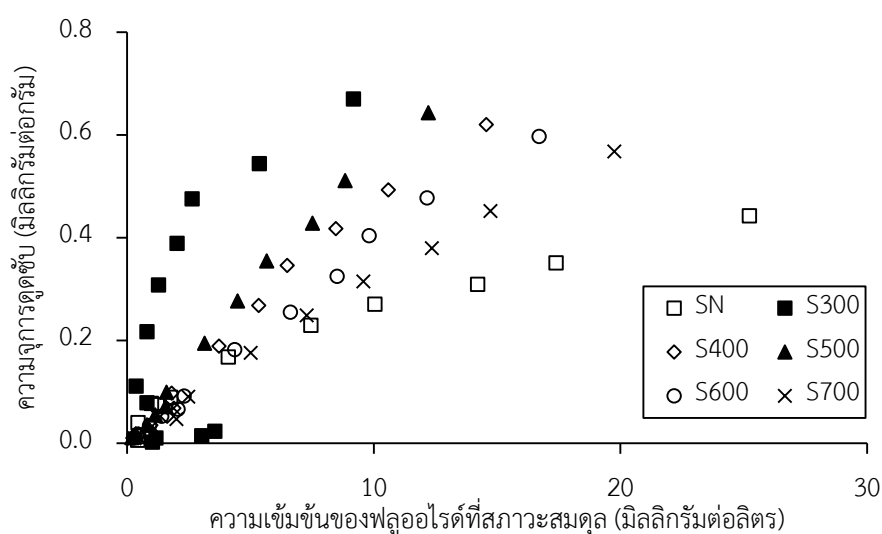
4.2.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้คือ ไอโซเทอมแบบเส้นตรง ไอโซเทอมของแลงเมียร์ ไอโซเทอมของฟรุนดลิช และไอโซเทอมของเทมกิน

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตะกอน ทำการทดลองในระบบที่ละเทที่มี ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้นแตกต่างกัน และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับที่กระตุ้น และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ

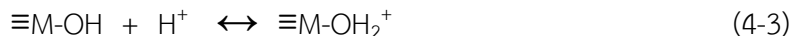
1) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน พบว่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือ และค่ากรด-ด่าง (pH) หลังการดูดซับฟลูออไรด์แสดงในภาคผนวก ข.4 จากการศึกษาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4- 16 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

จากผลการทดลองพบว่าถ้าสารละลายมีไอออนลบหรือมีกรดอ่อน พื้นผิวของตัวดูดซับจะปล่อยหมู่ OH^- ออกจากตัวดูดซับ สารประกอบบนพื้นผิวจะเกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) กับฟลูออไรต์ (Chen และคณะ, 2011) ดังสมการที่ 4-2 ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า pH ของสารละลายมีค่าอยู่ในช่วง 6.61 - 6.67 ทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะกรดเล็กน้อย ซึ่งค่า pH มีผลต่อหมู่ฟังก์ชันและพื้นผิวตัวดูดซับ โดยการดูดซับฟลูออไรต์ที่ pH ต่ำ ทำให้พื้นผิวตัวดูดซับจะปล่อยหมู่ OH^- ทำให้พื้นผิวประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะไอออนที่มีประจุบวกจึงสามารถดูดซับฟลูออไรต์ได้ดีขึ้นด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 4-3 และ 4-4 เมื่อ $\equiv\text{M}$ แสดงถึงองค์ประกอบบนพื้นผิวตะกอน เช่น Si, Al, Fe นอกจากนั้นจากการวัดประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500 ในหัวข้อ 4.1.7 พบว่ามีค่า pH_{zpc} เท่ากับ 6.8 ทั้งนี้ตัวดูดซับอื่นๆ ค่า pH_{zpc} อนุมานได้ว่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งมีค่ามากกว่า pH สารละลายเล็กน้อย แสดงว่าตัวดูดซับจะแสดงประจุบวกมากกว่า ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับไอออนลบได้ดี



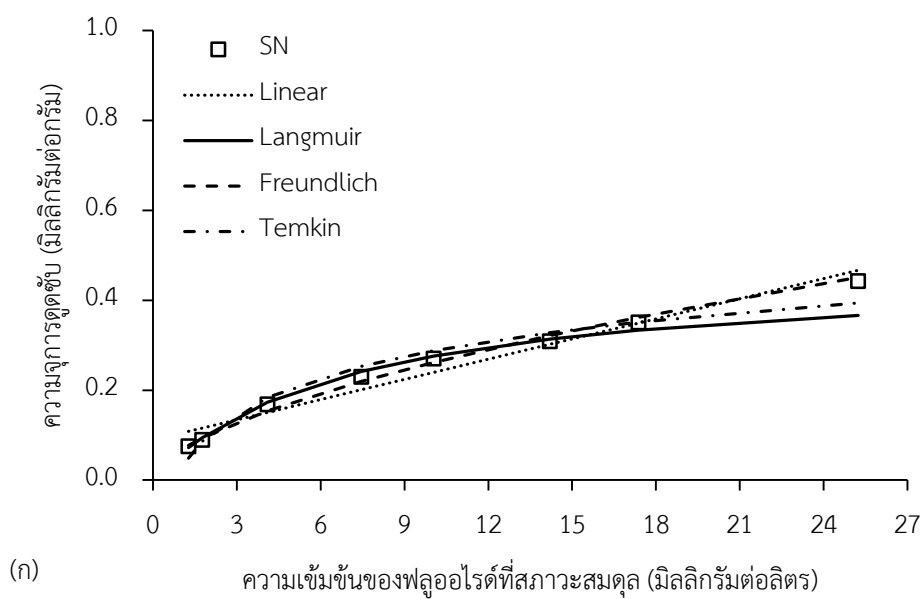
จากข้อมูลการทดลองสามารถเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรต์ของตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นกับตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอม พบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ตัวดูดซับ S300 และ S400 แม้จะเผาแล้วแต่ตัวดูดซับยังไม่คงรูป เมื่อถูกเขย่าทำให้ตัวดูดซับแตกและมีขนาดเล็กลงทำให้สารละลายมีความขุ่น และสารอินทรีย์ในตะกอนยังถูกเผาไหม้ไม่มากนัก เช่นเดียวกับการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับ SN, S300 และ S400 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ส่วนตัวดูดซับ S500 มีการดูดซับฟลูออไรต์ได้ดีที่สุด เนื่องจากการเผาตะกอนที่อุณหภูมินี้ทำให้องค์ประกอบบางส่วนในตะกอนเกิดการเปลี่ยนรูป (conversion) ไปอยู่ในรูปของสารออกไซด์ ซึ่งสามารถจับกับไอออนของฟลูออไรต์ในน้ำได้ (Moges และคณะ, 1996) ที่อุณหภูมินี้ยังทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ติดอยู่กับอนุภาคของตะกอนสลายตัวและหลุดออกจากพื้นผิวของตะกอนทำให้ตะกอนมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรต์ได้ดีขึ้น และการเผายังเป็นการเพิ่มความคงรูปของตัว

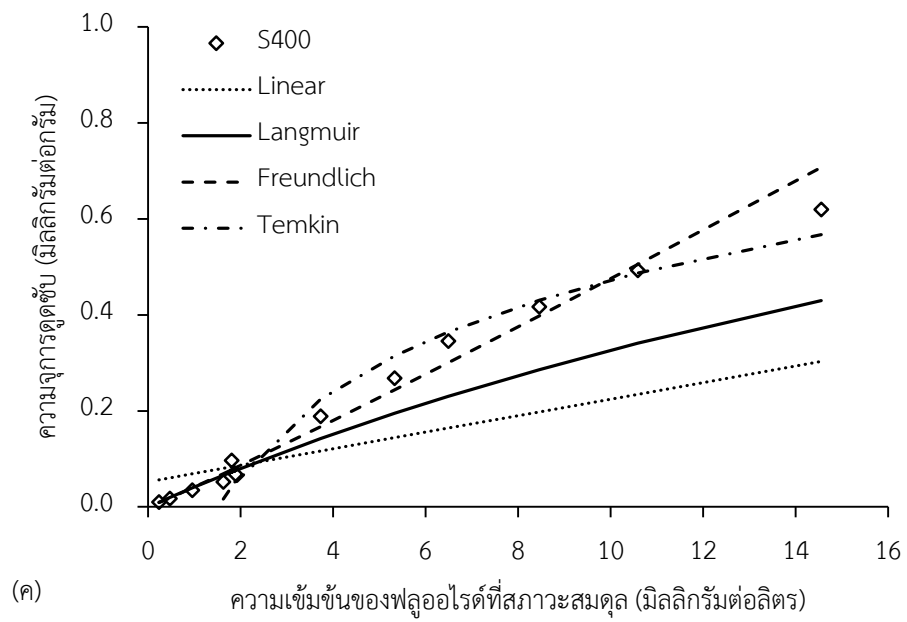
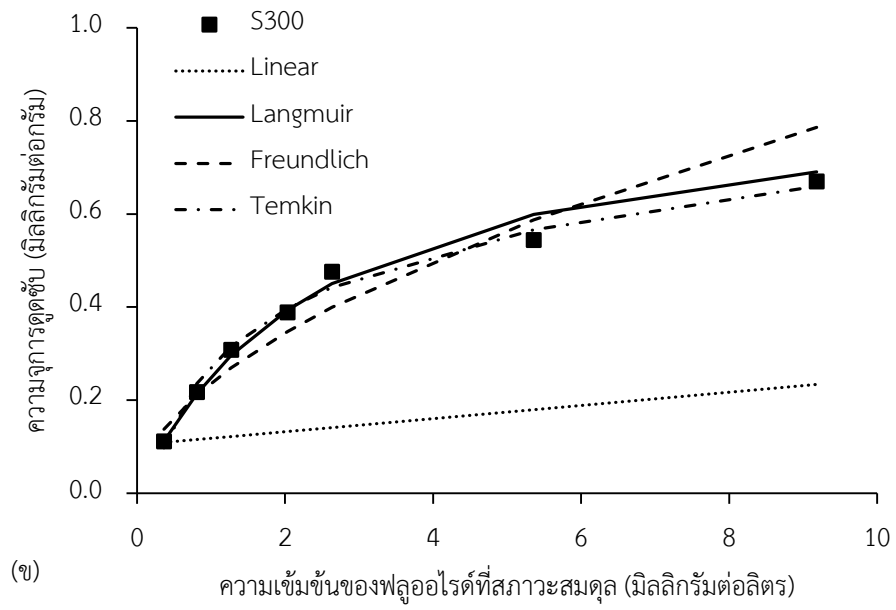
ดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับไม่แตกออกง่าย และจากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอม ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-7 โดยที่ค่าความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับ S500, S600 และ S700 มีความเข้ากันได้กับสมการแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกัน โดยภาพที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรุนดลิช และเทมกิน

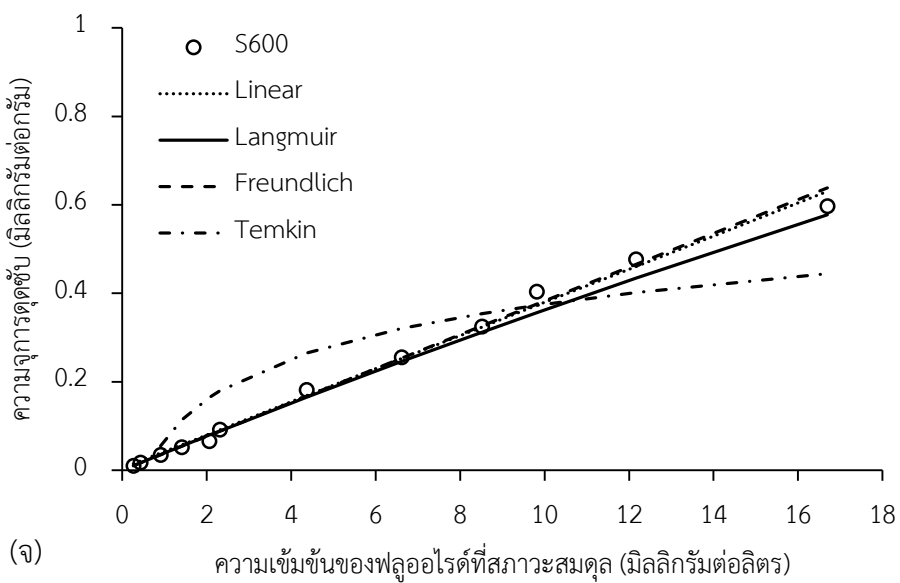
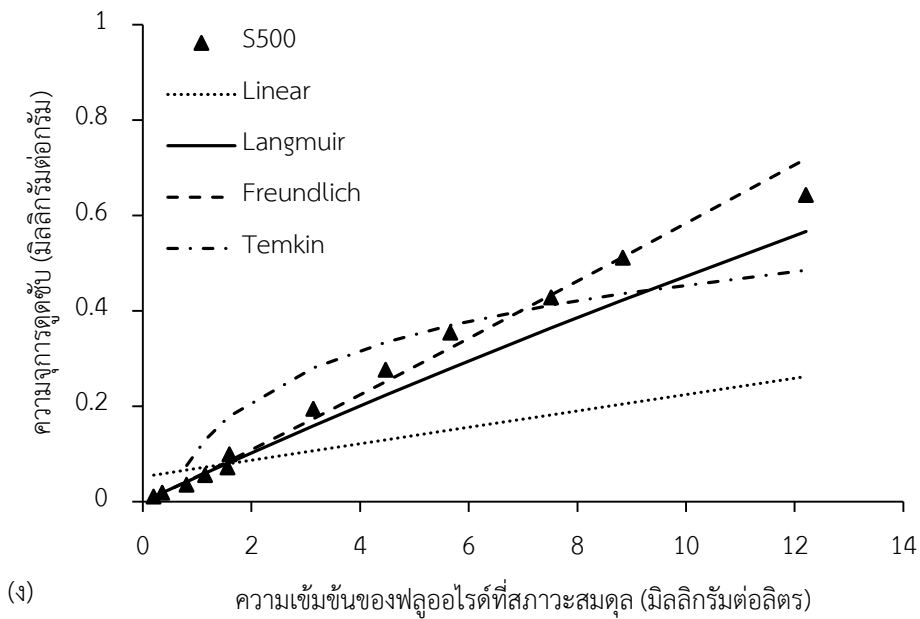
ตารางที่ 4- 7 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ SA, S300, S400, S500, S600 และ S700

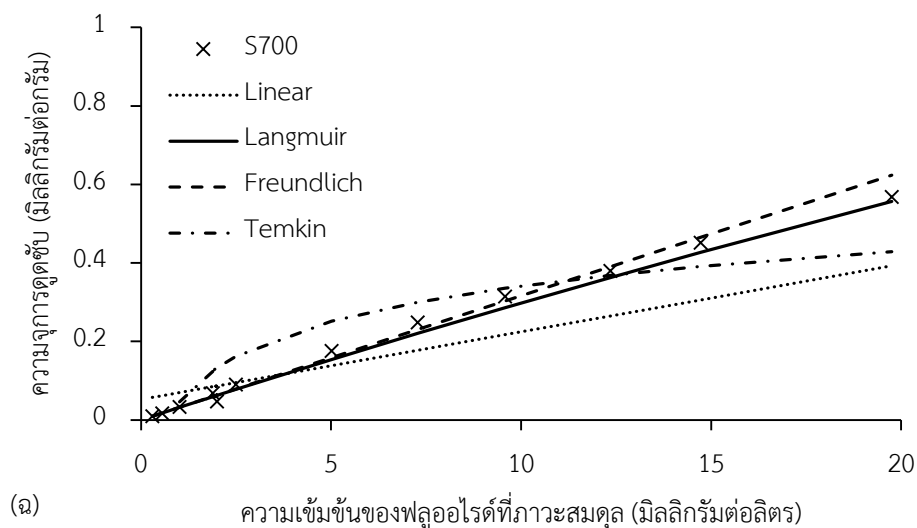
ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	K (มก./ก.)(มก./ล.)	$1/n$	R^2
SN	0.4682	0.1429	0.9922	0.0668	0.5920	0.9943
S300	0.8798	0.3983	0.9983	0.2365	0.5418	0.9396
S400	1.4134	0.0300	0.9892	0.0413	1.0609	0.9871
S500	5.1565	0.0101	0.9966	0.0526	1.0450	0.9936
S600	5.0820	0.0077	0.9975	0.0384	0.9985	0.9971
S700	5.1510	0.0061	0.9944	0.0317	0.9986	0.9920

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		เทมกิน		
	K_p (ล./ก.)	R^2	B (จูล/โมล)	A (ล./ก.)	R^2
SN	0.0150	0.9602	0.1158	1.1957	0.9608
S300	14.8435	0.8278	0.1744	4.7861	0.9895
S400	0.0454	0.9846	0.2515	0.6549	0.8183
S500	0.0555	0.9907	0.1504	2.0571	0.8226
S600	0.0375	0.9934	0.1337	1.6588	0.8136
S700	0.0296	0.9929	0.1288	1.4115	0.8365





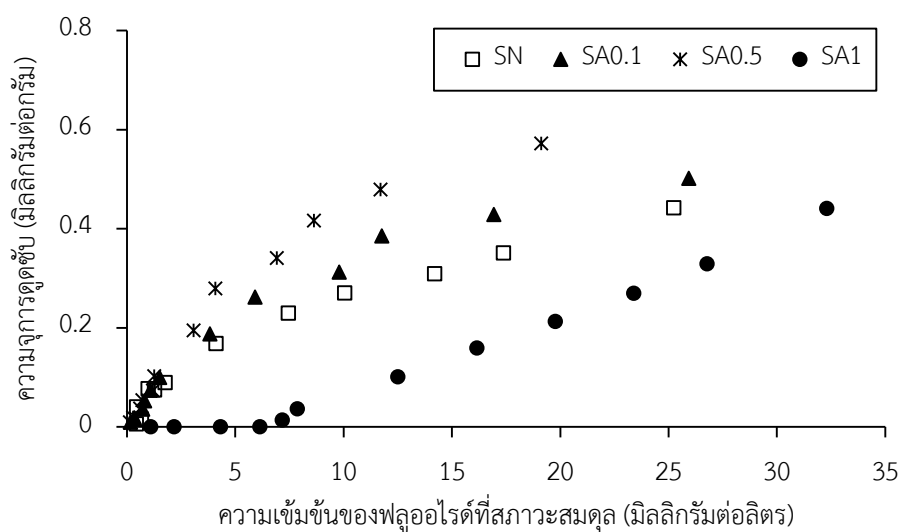




ภาพที่ 4-17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) S300 (ค) S400 (ง) S500 (จ) S600 และ (ฉ) S700 กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรอนด์ลิช เส้นตรง และเทมกิน

2) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

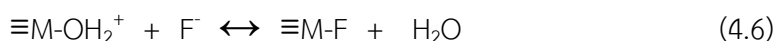
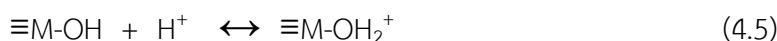
ผลการศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด พบว่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือ และความเป็นกรด-ด่าง (pH) หลังการดูดซับฟลูออไรด์แสดงในภาคผนวก ข จากการศึกษาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้กระตุ้นตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 0.1 โมลาร์ เป็น 0.5 โมลาร์ ทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้แค่ตะกอนเป็น 1 โมลาร์ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปจะไปทำลายโครงสร้างเดิมของตะกอน ซึ่งจากการทดลองหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ ในหัวข้อ 4.1.4 ได้เลือกใช้ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดและต่างความเข้มข้น 1 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่มากเกินไป จึงทำให้พื้นที่ผิวดูดซับเสียโครงสร้างไปเป็นสาเหตุให้พื้นที่ผิวดูดซับ

จากการวิเคราะห์พบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เนื่องจากการกระตุ้นตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) จะเข้าไปในโครงสร้างของตะกอน (Protonation) ทำให้ตะกอนมีประจุบวกจึงสามารถจับกับประจุลบได้ดีขึ้น (Tor และคณะ, 2009) ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6



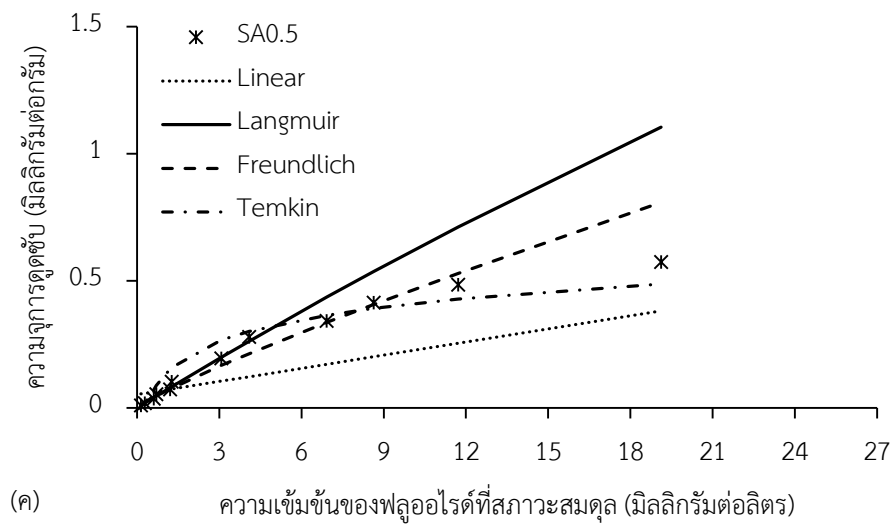
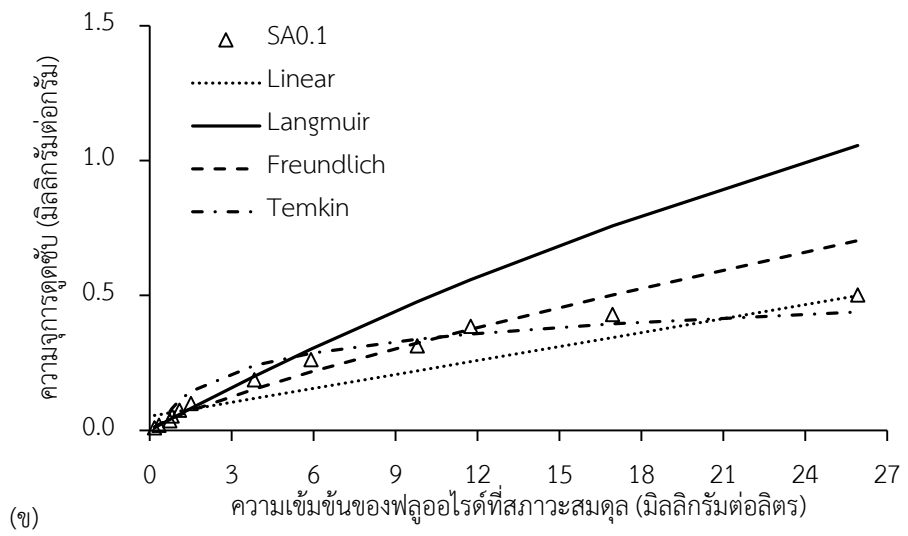
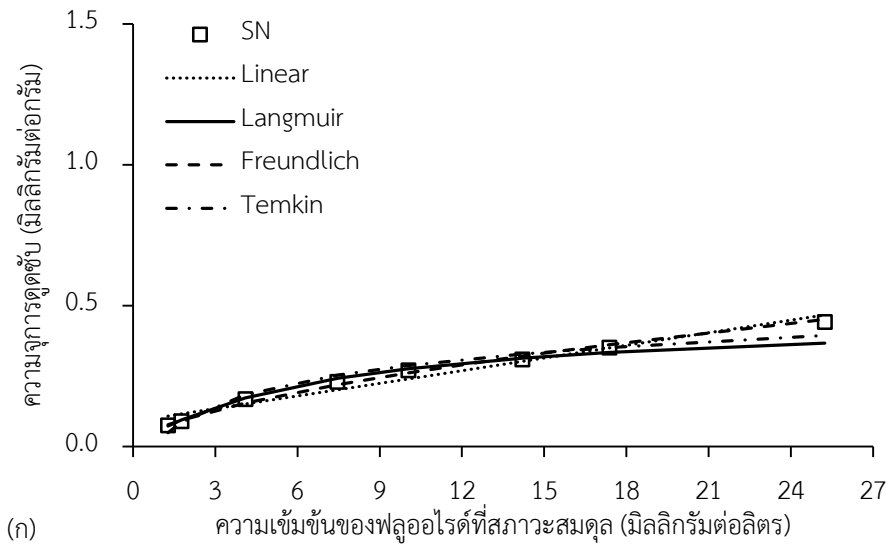
นอกจากนี้เมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ไปแทนที่ไอออนบวกอื่นๆ ในโครงสร้างตะกอน และไปดึงไอออนบวกบางตัวหรือเกิดการชะพวกแร่ที่เป็นเกลือต่างๆ บางส่วนออกจากโครงสร้างตะกอน ทำให้ตะกอนมีโครงสร้างที่เปิดและมีพื้นที่ผิวที่ใช้งานได้มากขึ้น นอกจากนี้การกระตุ้นตะกอนด้วยกรดจะเกิดการกัด หรือเจาะ (Acid penetration proceed) เข้าทางขอบไปในโครงสร้างหลังจากเกิดปฏิกิริยา จะได้โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวเพิ่ม และถ้ากระตุ้นตะกอนด้วยกรดความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้การออกซิไดซ์ที่ผิว (Oxidized surface) ทำให้ผิวหน้าของตะกอนเปลี่ยนสภาพเป็นไม่มีขั้ว (Non-polar) ทำให้ดูดซับฟลูออไรด์ได้น้อยลง ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของรูพรุนที่กระจายตัว ความเป็นกรดของตะกอน ปัจจัยเหล่านี้ขึ้นกับส่วนประกอบของตะกอน และวิธีการกระตุ้นตะกอนด้วย ซึ่งจากการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ SA1 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปจะไปทำลายพื้นที่ผิวดังที่กล่าวไปข้างต้น ดังนั้นจึงต้องเลือกความเข้มข้นของสารละลาย

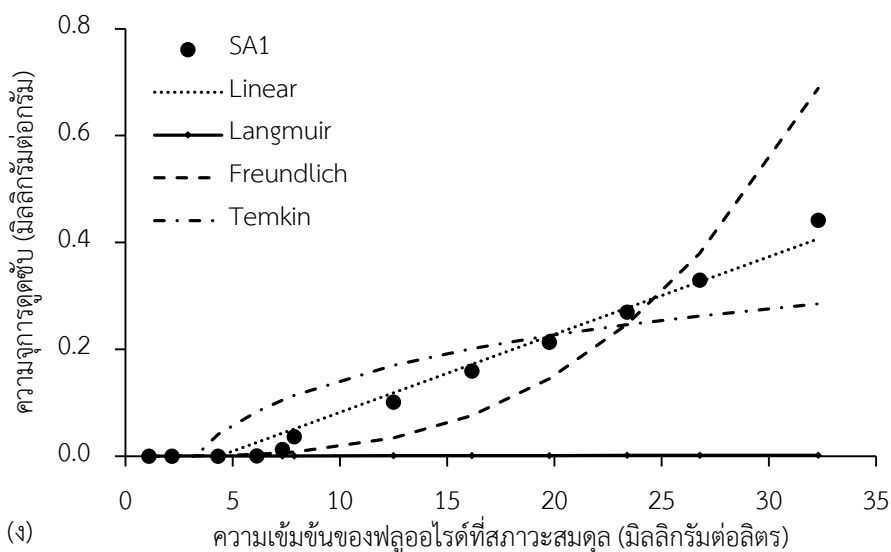
กรดที่จะใช้กระตุ้นตะกอนให้เหมาะสม (อนันต์ ตั้งเสถียรกิจ และวาริ ตาทอง, 2545) และจากข้อมูล การทดลองไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถนำมาวิเคราะห์ ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอม ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-8 โดยที่ค่าความถูกต้องของ ไอโซเทอมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลอง พบว่าตัวดูดซับ SA0.1 และ SA0.5 มีความเข้ากันได้กับสมการแบบแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่า R^2 ที่ ใกล้เคียงกัน โดยภาพที่ 4-19 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรุנדลิช และ เทมกิน

ตารางที่ 4- 8 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ SA, SA0.1, SA0.5 และ SA1

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุנדลิช		
	q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	K (มก./ก.)(มก./ล.)	$1/n$	R^2
SN	0.4682	0.1429	0.9922	0.0668	0.5920	0.9943
SA0.1	4.0264	0.0137	0.9961	0.0525	0.7973	0.9698
SA0.5	8.5910	0.0077	0.9977	0.0632	0.8638	0.9799
SA1	0.7573	0.0001	0.6988	0.0000	3.1774	0.8460

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		เทมกิน		
	K_p (ล./ก.)	R^2	B (จุล/โมล)	A (ล./ก.)	R^2
SN	0.0150	0.9602	0.1158	1.1957	0.9608
SA0.1	0.0204	0.8973	0.1034	2.6820	0.9273
SA0.5	0.0321	0.9072	0.1210	2.9322	0.8996
SA1	0.0146	0.9727	0.1213	0.3245	0.6975





ภาพที่ 4- 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 (ค) SA0.5 (ง) SA1 กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ แลงเมียร์ ฟรอนด์ลิช เส้นตรง และเทมกิน

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอนแต่ละแบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-9 ซึ่งไอโซเทอมแบบแลงเมียร์บอกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว โดยค่า q_m มีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการดูดซับ เมื่อค่า q_m มีค่ามาก ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูง และค่า b เป็นค่าคงที่ของไอโซเทอม ถ้าค่า b มีค่าน้อยแสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี

ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิชบอกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบหลายชั้น ซึ่งค่า K เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ส่วนค่า $1/n$ ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการ พบว่าตัวดูดซับที่มีความชันเท่ากับ 1 อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่าความชันน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ ค่าความชันมากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และเกิดการดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูง แต่จะเกิดการดูดซับได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการผลการทดลอง โดยทั่วไปไอโซเทอมที่มีความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส (Continuous Treatment) ส่วนไอโซเทอมที่มีความชันน้อยจะเหมาะสมที่จะใช้ในระบบบำบัดแบบทีละเท (Batch Treatment) (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

ไอโซเทอมแบบเทมกินนำไปใช้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ พลังงานการดูดซับจะลดลงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับ ซึ่งค่า B สัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ ส่วนค่า A สอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด

ตารางที่ 4- 9 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอม
SN	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช
S300	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
S400	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
S500	ทุกแบบ ยกเว้นไอโซเทอมแบบเทมกิน
S600	ทุกแบบ ยกเว้นไอโซเทอมแบบเทมกิน
S700	ทุกแบบ ยกเว้นไอโซเทอมแบบเทมกิน
SA0.1	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
SA0.5	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
SA1	ไอโซเทอมแบบเส้นตรง

จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าตัวดูดซับ SN ค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 0.4682 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อน และกรดไฮโดรคลอริกพบว่าตัวดูดซับ S300, S400, S500, S600, S700, SA0.1 และ SA0.5 ให้ค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 0.8798, 1.4134, 5.1565, 5.0820, 5.1510, 4.0264 และ 8.5910 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้ค่าความจุในการดูดซับของตะกอนเพิ่มมากขึ้น โดยการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ให้ค่าความจุในการดูดซับสูงสุดและมีค่าไม่ต่างกันมาก ดังนั้นการกระตุ้นด้วยความร้อนควรใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ให้ค่าความจุในการดูดซับสูงสุด แต่การใช้กรด 0.1 และ 0.5 โมลาร์ ในการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้สารละลายที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเท่ากับ 6.5-6.6 และ 6.3-6.4 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายหลังใช้ตัวดูดซับ

SA0.5 สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และความเข้มข้นกรด 1 โมลาร์ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นกรด 0.1 โมลาร์ ในการศึกษาหัวข้อต่อไป และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) ฟลูออไรด์ของตัวดูดซับในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมที่ทำในงานวิจัยนี้ กับตัวดูดซับอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น ตัวดูดซับจากดิน วัสดุจากธรรมชาติจากแหล่งต่างๆ เป็นต้น โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์เท่ากันคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชในสารละลายอยู่ในช่วง 6-9 และมีเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับมากกว่า 2 ชั่วโมง ได้ตั้งตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4- 10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ประเภทตัวดูดซับ		ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	อ้างอิง
กลุ่ม	ชื่อและคำอธิบาย		
แร่ออกไซด์ต่างๆ	Li ₂ O ₃ , Nd ₂ O ₃ , Pr ₆ O ₁₁ , Sm ₂ O ₃ จากอินเดีย	196.08	Raichur และ Basu, 2001
วัสดุดูดซับราคาถูก	Hydroxyapatite	10.50	Srimurali และคณะ, 1998
	Quartz	0.23	
	Fluorspar	0.15	
	Activate quartz	0.10	
	Calcite	0.07	
ถ้ำกระดูก	-	1.06	Abe และ Iwasaki, 2003
Smectite	BEN South Africa	0.1	Coetzee และคณะ, 2003
	Alkaline soil USA	0.04-0.08	Bower และ Hatcher, 1967

ตารางที่ 4- 10 (ต่อ) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ประเภทตัวดูดซับ		ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	อ้างอิง
กลุ่ม	ชื่อและคำอธิบาย		
Activated alumina	Type 504C, Fluka	0.5	Coetzee และคณะ, 2003
Gibbsite	BAUX3 Australia	0.4	Coetzee และคณะ, 2003
Activated Carbon	from coal	0.02-0.08	Abe และ Iwasaki, 2003
	From wood	0.02-0.04	
	From petroleum	0.02	
Carbon black	-	0.07	Abe และ Iwasaki, 2003
Goethite/Kaolinite	PTA-LAT South Africa	0.2	Coetzee และคณะ, 2003
Goethite/illite	Tertiary soil Shanxi China	0.23	Wang และ Reardon, 2001
Copper oxide coated alumina	-	7.77	Bansawal และคณะ, 2010
Zirconium-iron oxide	-	9.80	Viswanathan และ Meenakshi, 2010
ตะกอนน้ำประปา	กระตุ้นที่ 500°C	5.1565	งานวิจัยนี้
	กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์	4.0264	งานวิจัยนี้

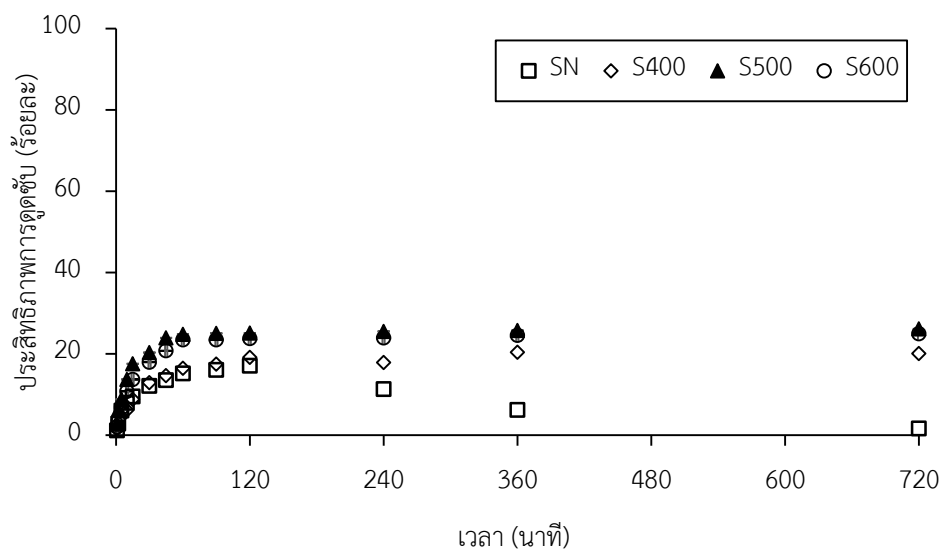
4.2.2 การศึกษาการดูดซับไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยว

4.2.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรท

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตะกอนในการศึกษานี้ เลือกใช้ตัวดูดซับจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ที่ผ่านมา โดยตัวดูดซับที่เลือกมาศึกษา ได้แก่ ตัวดูดซับ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5 ทำการทดลองในระบบที่ละเท โดยใช้ความเข้มข้นของไนเตรท 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นคงที่จะได้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับและนำเวลาที่ได้ไปใช้ในการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับต่อไป

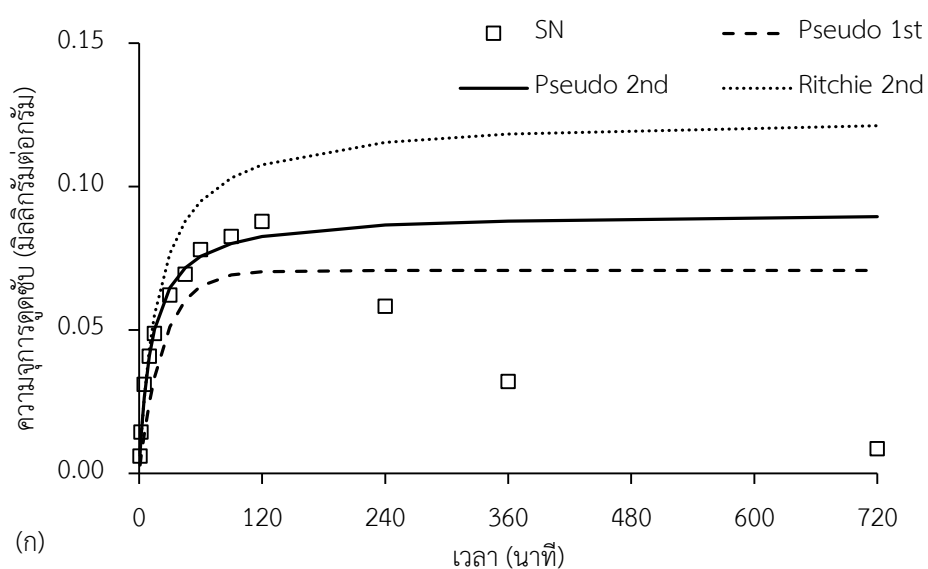
1) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

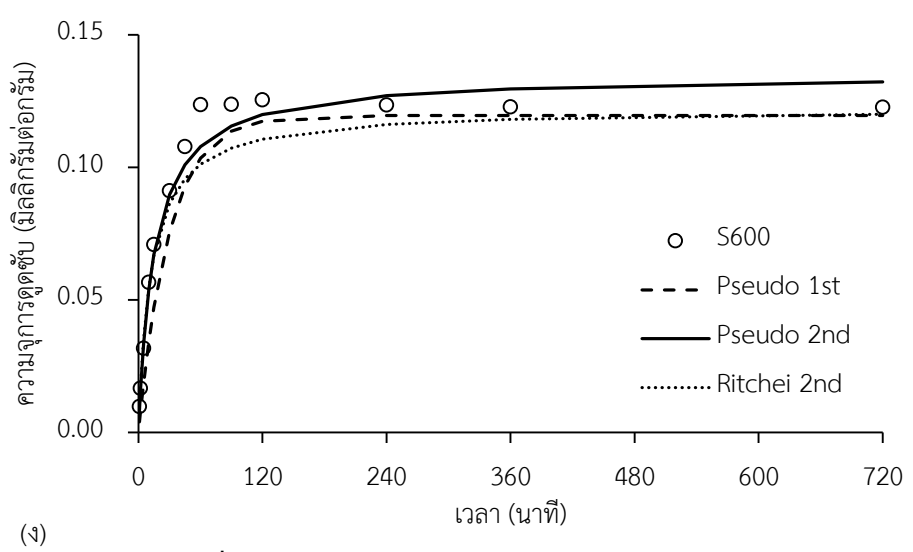
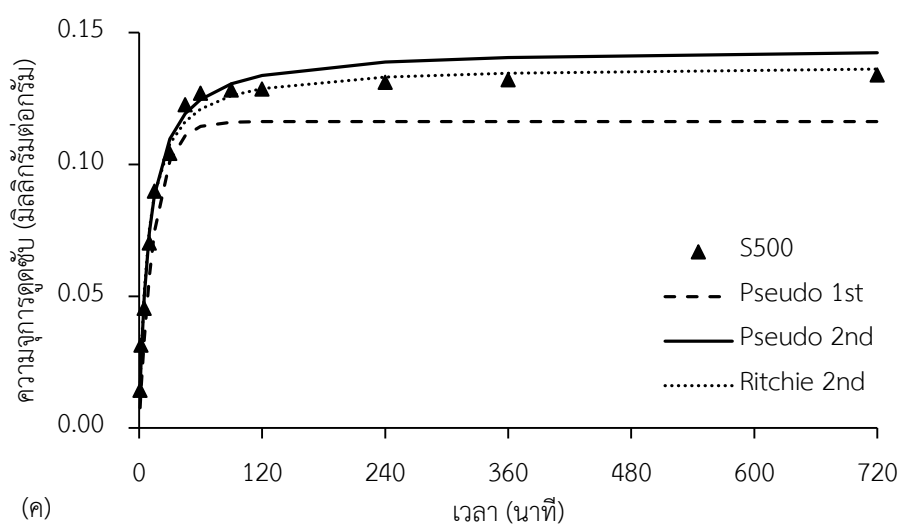
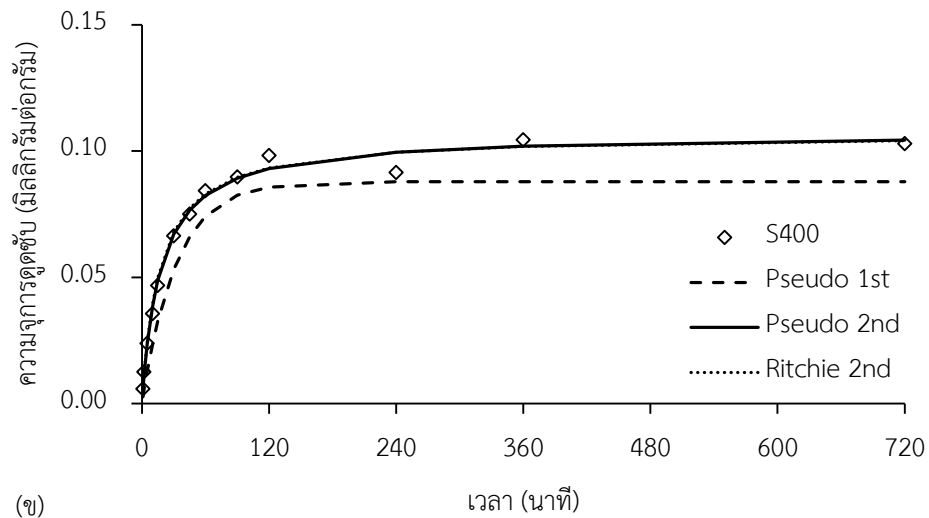
จากการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและเวลาตามภาพที่ 4-20 เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับ SN, S400, S500 และ S600 พบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน S500 และ S600 สามารถดูดซับไนเตรทและเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น โดยตัวดูดซับ SN และ S400 ใช้เวลาประมาณ 90 นาที ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ แต่ตัวดูดซับ SN มีการแตกออก ทำให้สารละลายมีความขุ่น ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนตัวดูดซับ S500 และ S600 เกิดการดูดซับไนเตรทขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นการดูดซับจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับโดยใช้เวลาประมาณ 60 นาที การที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้นเนื่องจากตัวดูดซับที่เผาแล้วมีรูพรุนมากขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ และตะกอนที่ได้มีความคงรูป ไม่แตกออกมาในสารละลาย



ภาพที่ 4- 20 จลนพลศาสตร์การดูดซับในเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

จากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับในเตรทของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน สามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน และสมการอันดับสองเหมือนของ Ritchie ดังภาพที่ 4-21 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4-11 โดยที่ค่าความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลองพบว่า การดูดซับเป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า





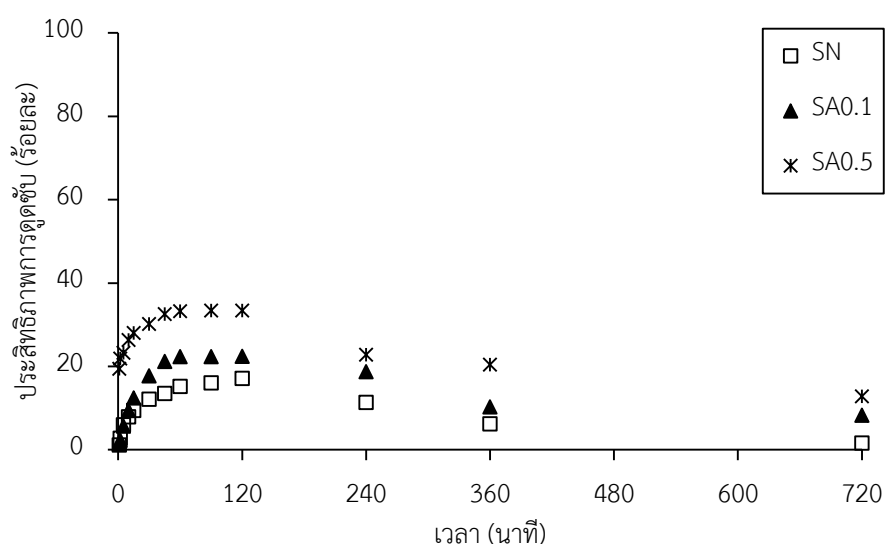
ภาพที่ 4- 21 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ
(ก) SN (ข) S400 (ค) S500 และ (ง) S600

ตารางที่ 4- 11 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับในเมตรด้วยตัวดูดซับที่กระตุ่นด้วยควมร้อน

ตัวดูดซับ	q (ทดลอง) (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order			Ritchie Second Order		
		R ²	K ₁ (นาที ⁻¹)	q _e (มก./ก.)	R ²	K ₂ (ก./มก.·น.)	q _e (มก./ก.)	R ²	K _r (ล./น.)	q _e (มก./ก.)
SN	0.0826	0.9783	0.0428	0.0707	0.9928	0.9032	0.0910	0.9833	0.0535	0.1244
S400	0.0898	0.9919	0.0308	0.8822	0.9944	0.6015	0.1033	0.9952	0.1130	0.0770
S500	0.1271	0.9682	0.0683	0.1163	0.9905	0.7339	0.1443	0.9844	0.1208	0.1377
S600	0.1205	0.9851	0.0334	0.1196	0.9957	0.4871	0.1351	0.9953	0.0801	0.1222

2) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

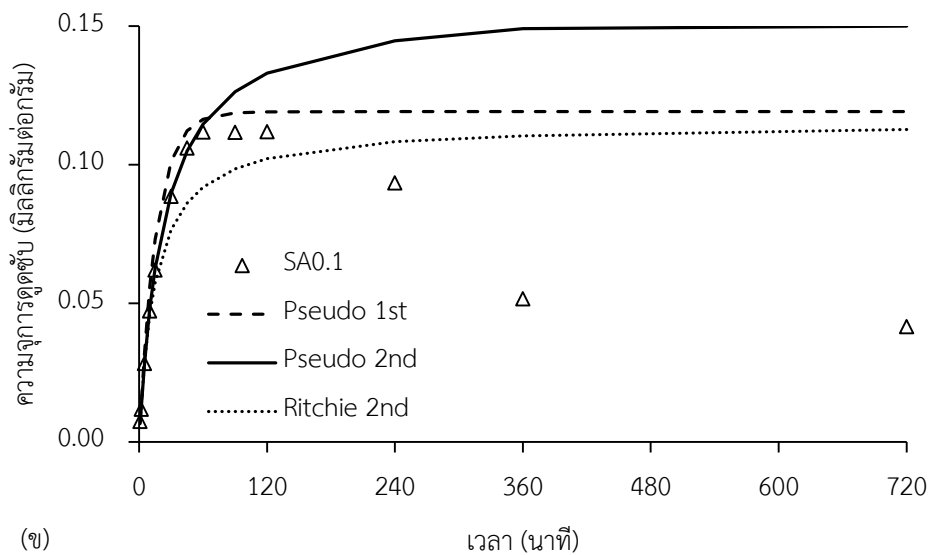
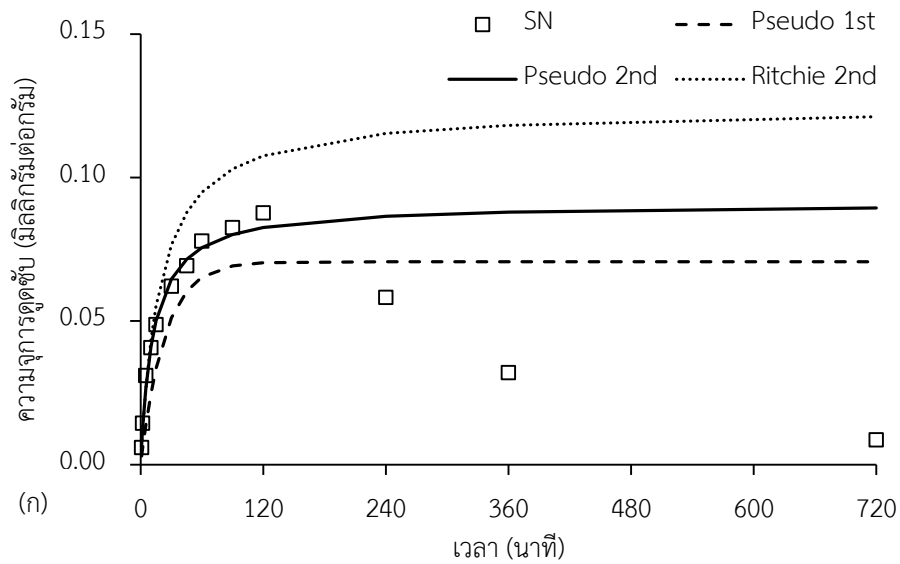
จากการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและเวลาตามภาพที่ 4-22 เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับ SN, SA0.1 และ SA0.5 พบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถดูดซับไนเตรทและเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น ซึ่งการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดใช้เวลาประมาณ 60 นาที ในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ การที่ตัวดูดซับที่กระตุ้นกรดเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเข้าไปจับในโครงสร้างของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ และเมื่อดูดซับไปถึงนาทิตี 240 พบว่าตัวดูดซับเริ่มแตกออก เนื่องจากตัวดูดซับยังไม่คงรูปมากพอ

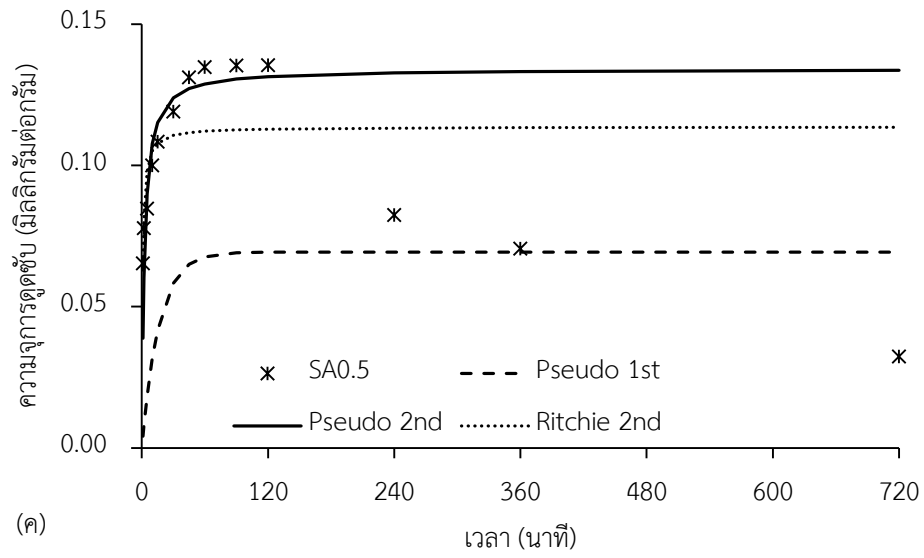


ภาพที่ 4- 22 จลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

ตัวดูดซับ SA0.1 และ SA0.5 ทำให้สารละลายที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับเท่ากับ 6.5-6.6 และ 6.3-6.6 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายหลังใช้ตัวดูดซับ SA0.5 มีค่าสูงเกินมาตรฐานน้ำบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ดังนั้น SA0.5 ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน จากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน และสมการอันดับสองเหมือนของ Ritchie ดังภาพที่ 4-23 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่

4-12 โดยที่ค่าความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลองพบว่า การดูดซับเป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเหมือน เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า





ภาพที่ 4- 23 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 และ (ค) SA0.5

ตารางที่ 4- 12 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับในเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ่นด้วยกรด

ตัวดูดซับ	q (ทดลอง) (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order			Ritchie Second Order		
		R ²	K ₁ (นาที ⁻¹)	q _e (มก./ก.)	R ²	K ₂ (ก./มก.·น.)	q _e (มก./ก.)	R ²	K _r (ล./น.)	q _e (มก./ก.)
SN	0.0826	0.9783	0.0428	0.0707	0.9928	0.9032	0.0910	0.9833	0.0535	0.1244
SA0.1	0.1118	0.9816	0.0632	0.1192	0.9925	0.2736	0.1587	0.9889	0.0663	0.1151
SA0.5	0.1345	0.9711	0.0613	0.0693	0.9943	3.0361	0.1341	0.8746	1.2458	0.1136

ดังนั้นจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทจะเห็นว่า การกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและกรดทำให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและกรดช่วยปรับปรุงพื้นที่ผิวในการดูดซับ สำหรับการศึกษานี้สรุปสถานะคงที่การดูดซับ (Equilibrium adsorption) และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการดูดซับไนเตรทได้ดังตารางที่ 4-13 เป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเหมือน ซึ่งแสดงว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคู่ขึ้นกับปริมาณไนเตรทและพื้นที่ดูดซับ

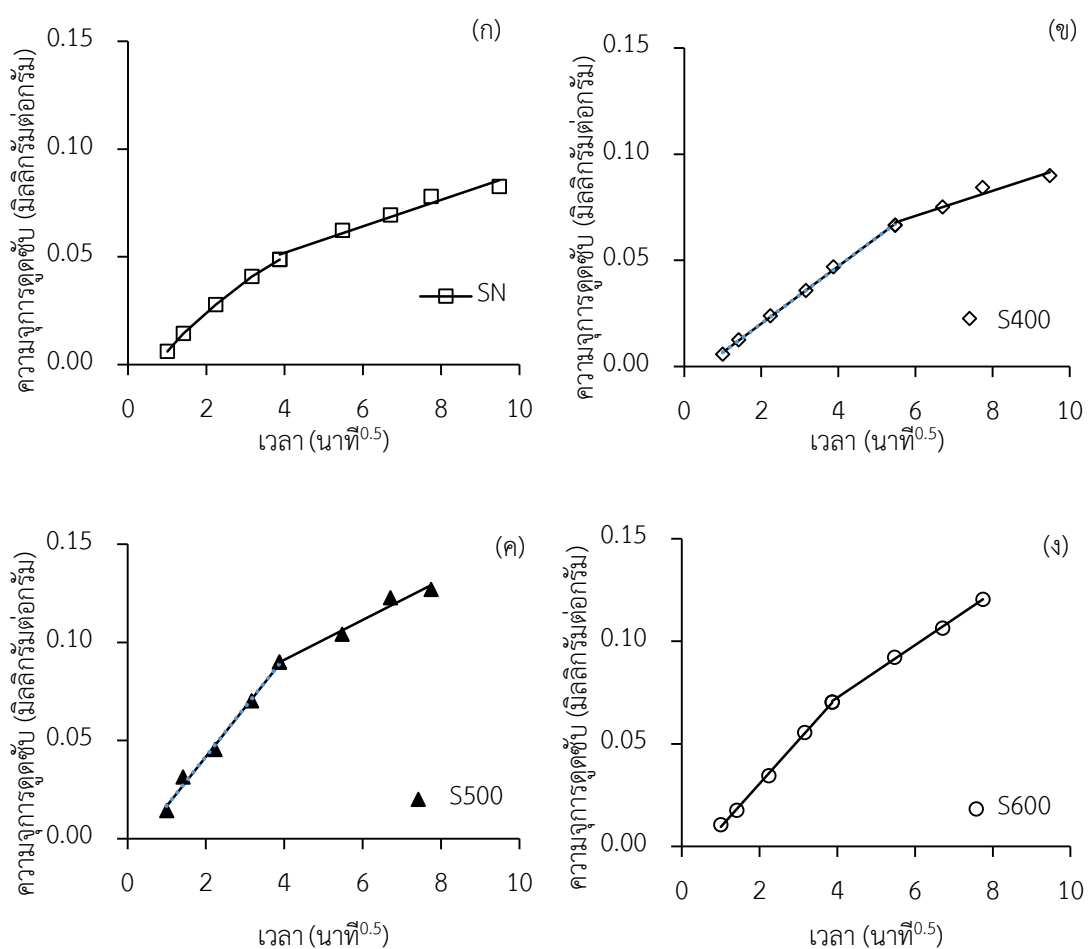
ตารางที่ 4- 13 สรุปเวลาเข้าสู่สมดุลและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

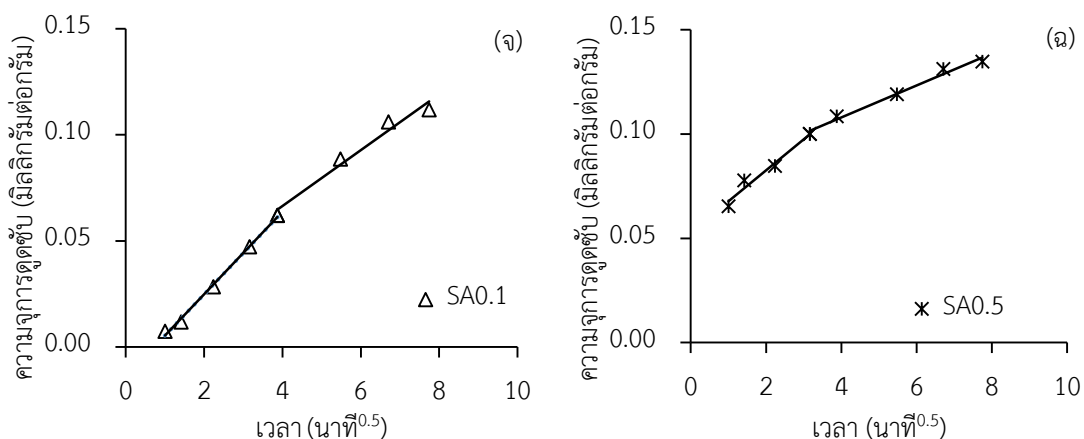
ตัวดูดซับ		เวลาในการเข้าสู่สมดุล	แบบจำลองจลนพลศาสตร์	ตัวดูดซับและสารละลาย
ตะกอนที่ไม่ได้กระตุ้น (SN)		90 นาที	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	แตกและสารละลายขุ่น
ตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อน	S400	90 นาที	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	S500	60 นาที	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	S600	60 นาที	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือนและสมการอันดับสองเหมือนของ Ritchie	คงรูป
ตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรด	SA0.1	60 นาที	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป
	SA0.5	60 นาที	จลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน	คงรูป

4.2.2.2 การศึกษากลไกการดูดซับไนเตรท

การศึกษาขั้นของการเกิดปฏิกิริยาหาจากช่วงที่การดูดซับยังไม่เข้าสู่สมดุลนั้นว่าช่วงใดมีความชันหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาค่าที่สุด ซึ่งจะเป็นช่วงที่เป็นขั้นกำหนดอัตราของปฏิกิริยา โดยทั่วไปจากการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสามารถแบ่งช่วงการดูดซับออกเป็นสามช่วง ในช่วงที่หนึ่งเป็นผลของการดูดซับในชั้นแพร์ซันฟิล์ม (Film diffusion) ในสารละลายผ่านไปที่ผิวนอกของตัวดูดซับ ในช่วงที่สอง เกิดจากการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) หรือการแพร่ภายในรูพรุน (Pore diffusion) และในช่วงที่สาม การดูดซับเท่ากับการคายซับหรือถึงระยะเวลาสมดุล ดังนั้น

ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-24 กระบวนการดูดซับระหว่างไนเตรทกับตัวดูดซับ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5 พบว่าตัวดูดซับเกิดการดูดซับ 2 ขั้นตอน ตะกอนดูดซับไนเตรทในขั้นแรก (k_{ip1}) เกิดขึ้นมากกว่าในขั้นที่สอง (k_{ip2}) ในขั้นตอนแรกเป็นการแพร่ผ่านของไนเตรทเข้าสู่ชั้นของเหลว เข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับแสดงให้เห็นเป็นความชันแรก ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณไนเตรทอยู่มาก ทำให้มีแรงผลักเข้าสู่ตัวดูดซับมาก ในขณะที่ขั้นที่สองเป็นสมดุลของการดูดซับเกิดจากความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายมีค่าลดลง โดยผลการวิเคราะห์ค่า K_{ip} แสดงในตารางที่ 4-14





ภาพที่ 4- 24 กลไกการดูดซับในเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ

(ก) SN (ข) S400 (ค) S500 (ง) S600 (จ) SA0.1 และ (ฉ) SA0.5

ตารางที่ 4- 14 ค่าคงที่กลไกการดูดซับในเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค

ตัวดูดซับ	ความชันที่ 1	
	K_{ip1}	C
SN	0.0148	-0.0071
S400	0.0136	-0.0069
S500	0.0252	-0.0085
S600	0.0211	-0.0116
SA0.1	0.0195	-0.0141
SA0.5	0.0148	0.0539

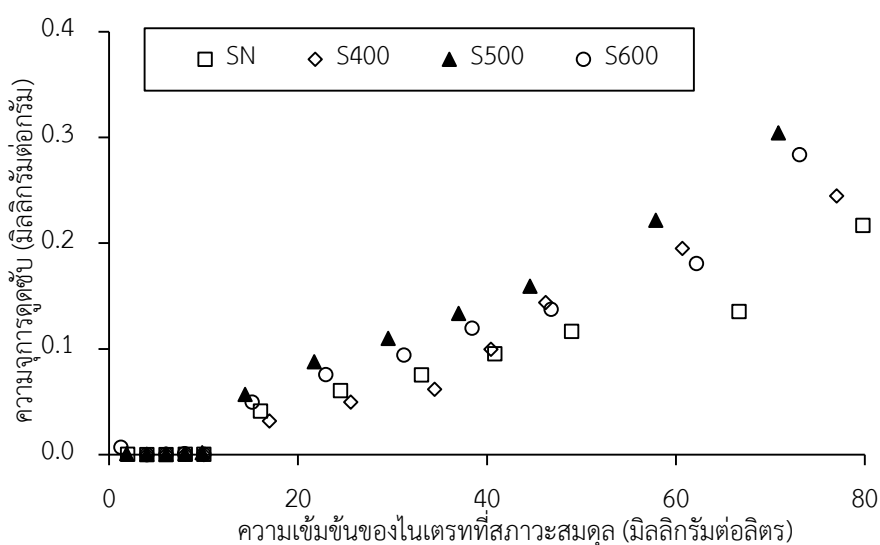
4.2.2.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในเตรท

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คือ ไอโซเทอมแบบเส้นตรง ไอโซเทอมของแลงเมียร์ ไอโซเทอมของฟรุนดลิช และไอโซเทอมของเทมกิน

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทด้วยตะกอนน้ำประปา ทำการทดลองในระบบที่ละเททีที่มีความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นแตกต่างกัน และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที ใช้เวลา 90 นาที ตามเวลาเข้าสู่สมดุล การดูดซับของตัวดูดซับ SN และ S400 และใช้เวลา 60 นาที ตามเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับ S500, S600, SA0.1 และ SA0.5 และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ

1) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

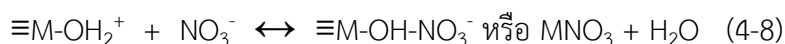
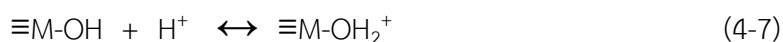
ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือ และความเป็นกรด-ด่าง (pH) หลังการดูดซับฟลูออไรด์แสดงในภาคผนวก ข.5 และจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4- 25 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน

จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับเริ่มดูดซับไนเตรทที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความเข้มข้นของไนเตรทที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายและความเข้มข้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดแรงผลักดัน (Driving Force) ที่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นพบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยการดูดซับไนเตรทเนื่องจากพื้นผิวตะกอนเป็นพื้นผิว

ไฮดรอกซิลเลต (Hydroxylated surface) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่สามารถเกิดพันธะกับน้ำได้ทันที ทำให้เกิดประจุขึ้นบนพื้นผิวของตะกอน ดังนั้นจึงเกิดปฏิสัมพันธ์ชั้นระหว่างไอออนของไนเตรทและโลหะออกไซด์ ซึ่งเกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ขึ้น (ligand exchange) และจากการทดลองพบว่าค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับมีค่าอยู่ในช่วง 6.62 - 6.67 ทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะกรดเล็กน้อย ซึ่งค่า pH มีผลต่อหมู่ฟังก์ชันและพื้นผิวดูดซับ โดยการดูดซับไนเตรทที่ pH ต่ำ ทำให้พื้นผิวดูดซับจะปล่อยหมู่ OH⁻ ทำให้พื้นผิวประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะไอออนที่มีประจุบวกจึงสามารถดูดซับไนเตรทได้ดีขึ้นด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 4-7 และ 4-8 เมื่อ ≡M แสดงถึงองค์ประกอบบนพื้นผิวตะกอน เช่น Si, Al, Fe นอกจากนั้นจากการวัดประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500 ในหัวข้อ 4.1.7 พบว่ามีค่า pH_{ZPC} เท่ากับ 6.8 ทั้งนี้ตัวดูดซับอื่นๆ ค่า pH_{ZPC} อนุมานได้ว่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งมีค่ามากกว่า pH สารละลายเล็กน้อย แสดงว่าตัวดูดซับจะแสดงประจุบวกมากกว่า ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับไอออนลบได้ดี

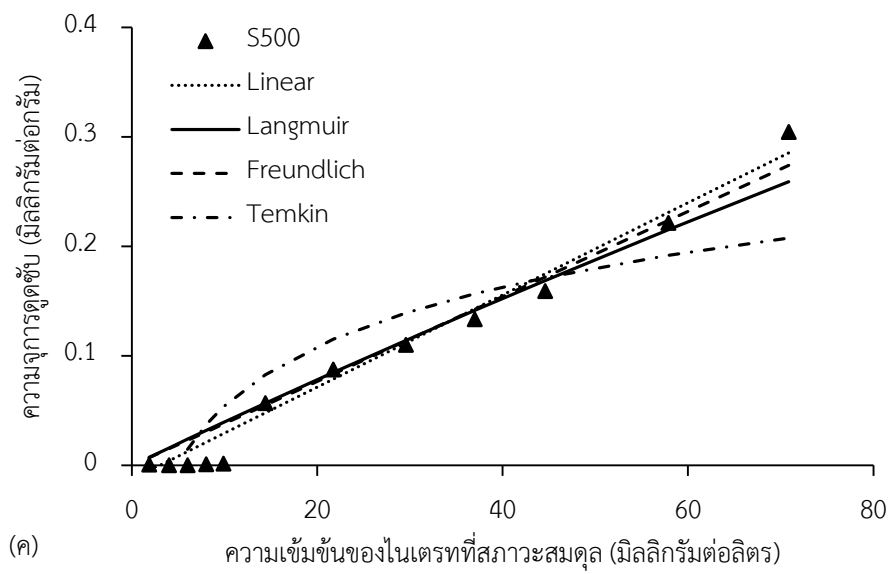
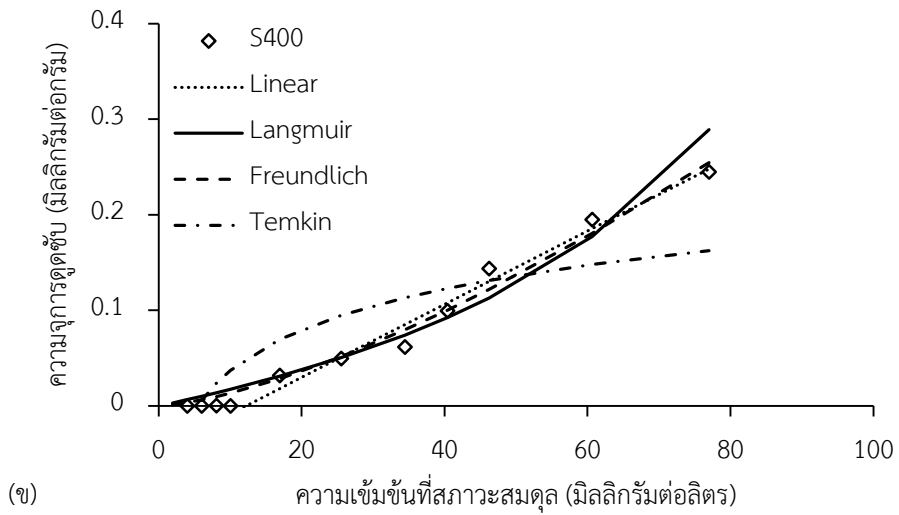
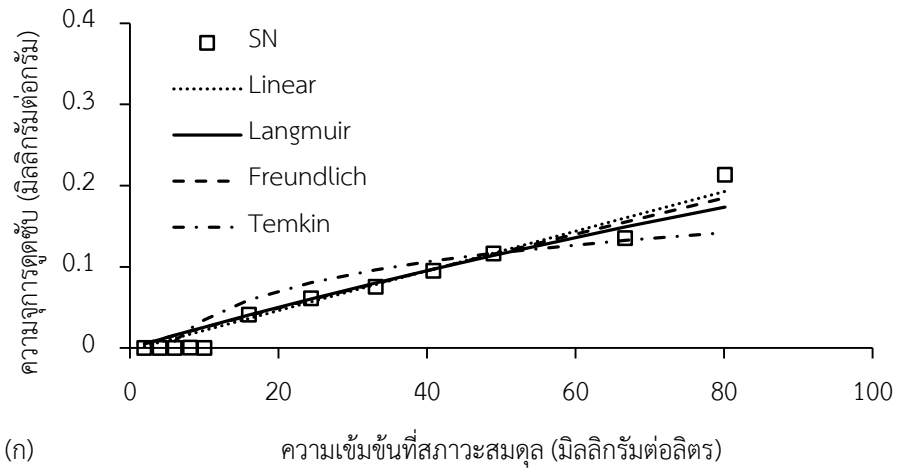


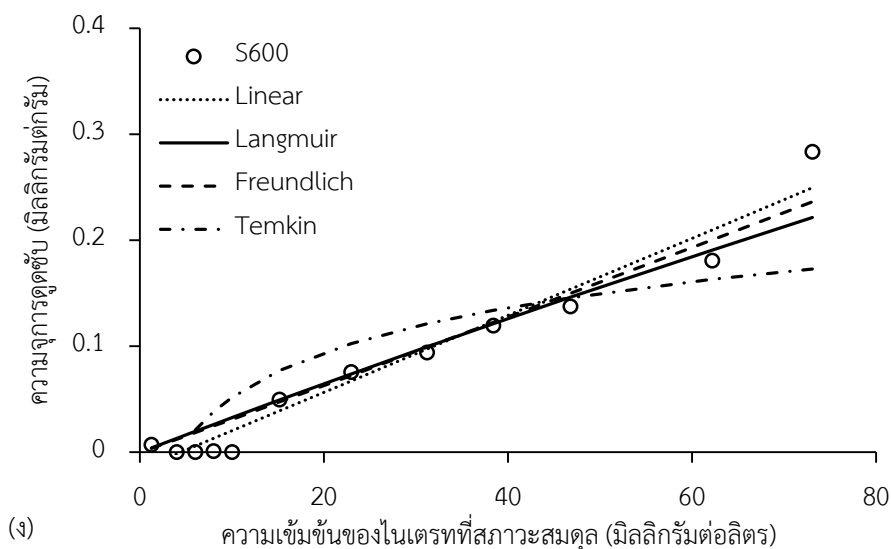
นอกจากนี้การเผาทำให้องค์ประกอบบางส่วนในตะกอนเกิดการเปลี่ยนรูป (conversion) ไปอยู่ในรูปของสารออกไซด์ ซึ่งสามารถจับกับไอออนของไนเตรทในน้ำได้ (Moges และคณะ, 1996) ที่อุณหภูมินี้ยังทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ติดอยู่กับอนุภาคของตะกอนสลายตัวและหลุดออกจากพื้นผิว ทำให้สามารถดูดซับไนเตรทได้ดีขึ้น และการเผายังเป็นการเพิ่มความคงรูปให้ตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับไม่แตกออกง่าย และจากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอม ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-15 ความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับมีความเข้ากันได้กับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่า R² ที่ใกล้เคียง 1 โดยภาพที่ 4-26 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรอนดลิช และเทมกิน

ตารางที่ 4- 15 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ SA, S400, S500 และ S600

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	K (มก./ก.)(มก./ล.)	$1/n$	R^2
SN	0.9586	0.0028	0.9907	0.0028	0.9543	0.9750
S400	1.2291	0.0016	0.9970	0.0024	0.9187	0.9956
S500	2.8087	0.0014	0.9934	0.0034	1.0059	0.9863
S600	2.6174	0.0013	0.9908	0.0030	0.9803	0.9704

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		เทมกิน		
	K_p (ล./ก.)	R^2	B (จูล/โมล)	A (ล./ก.)	R^2
SN	0.0024	0.9453	0.0516	0.1960	0.7902
S400	0.0016	0.9940	0.0680	0.0819	0.9635
S500	0.0042	0.9782	0.1756	0.0650	0.8963
S600	0.0036	0.9324	0.1597	0.0597	0.8349

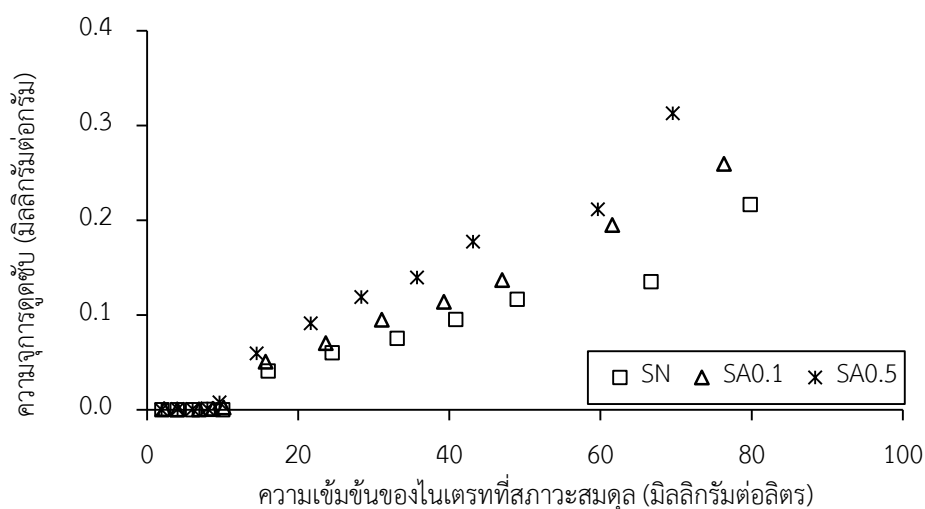




ภาพที่ 4- 26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) S400 (ค) S500 (ง) S600

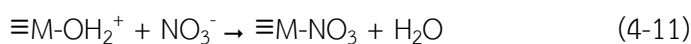
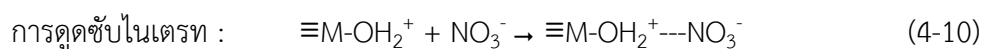
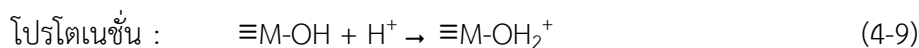
2) ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 โมลาร์ พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือ และค่ากรด-ด่าง (pH) หลังการดูดซับไนเตรทแสดงในภาคผนวก ข.5 จากการศึกษาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามภาพที่ 4-27



ภาพที่ 4- 27 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด

จากผลการทดลองพบว่าตะกอนเริ่มเกิดการดูดซับที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความเข้มข้นของไนเตรทที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายและความเข้มข้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดแรงผลักดัน (Driving Force) ที่มากขึ้น และการกระตุ้นด้วยกรดทำให้ตัวดูดซับดูดซับไนเตรทได้มากขึ้น และเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 0.1 โมลาร์ เป็น 0.5 โมลาร์ ทำให้ตัวดูดซับดูดซับไนเตรทได้มากขึ้น การดูดซับที่เกิดขึ้นมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เนื่องจากการกระตุ้นตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) จะเข้าไปในโครงสร้าง (Protonation) ที่พื้นผิวตัวดูดซับ ทำให้พื้นผิวมีประจุบวกมากขึ้น จึงเกิดการดูดซับไนเตรทที่มีประจุลบได้มากขึ้น ดังสมการที่ 4-9, 4-10 และ 4-11 (Loganathan และคณะ, 2013) นอกจากนั้นการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดจะเกิดการแทนที่โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) บนพื้นผิวตะกอน และเกิดการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ บนพื้นผิวออกไป (Bekele และคณะ, 2014) เช่นเดียวกับการดูดซับฟลูออไรด์

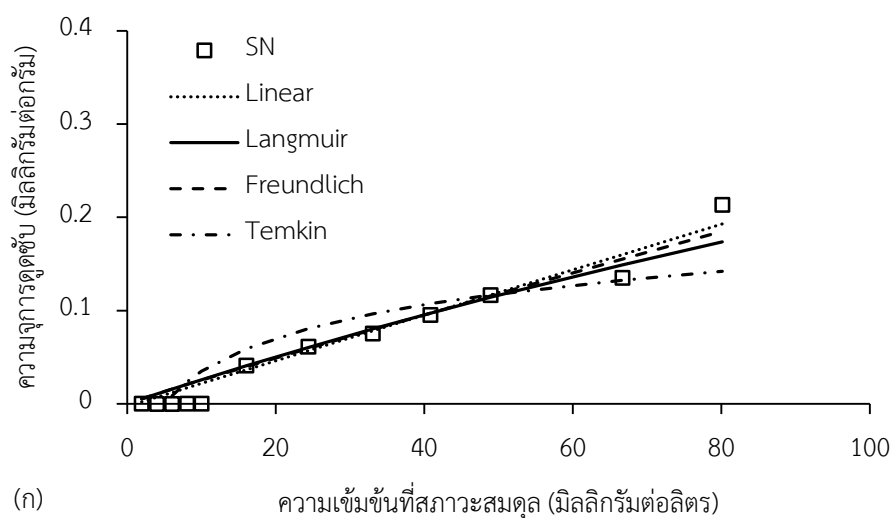


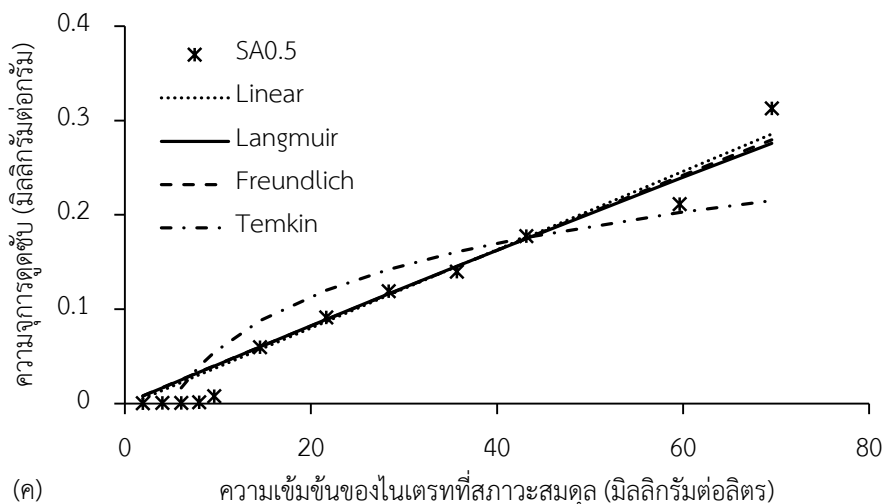
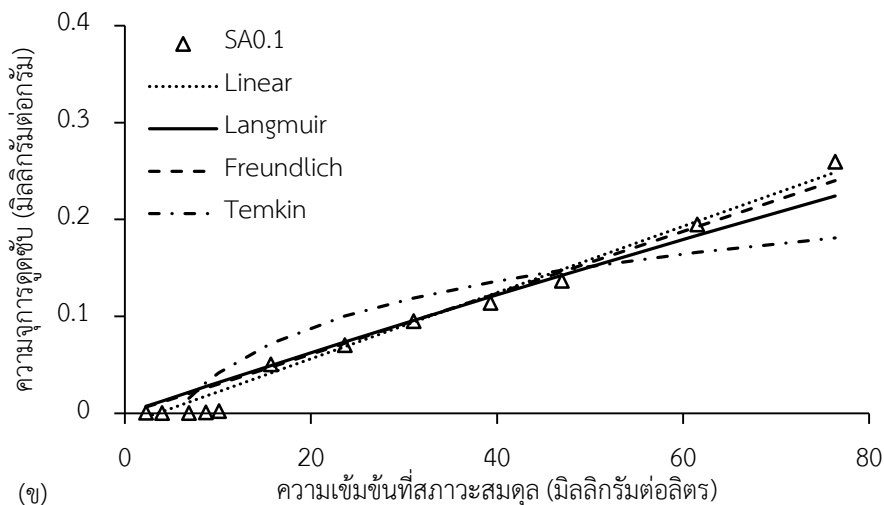
จากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอม ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-16 โดยความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่าตัวดูดซับมีความเข้ากันได้กับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่า R^2 ที่ใกล้เคียง 1 โดยภาพที่ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรุนดลิช และเทมกิน

ตารางที่ 4- 16 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ SA, SA0.1 และ SA0.5

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	K (มก./ก.)/(มก./ล.)	$1/n$	R^2
SN	0.9586	0.0028	0.9907	0.0028	0.9543	0.9750
SA0.1	2.6700	0.0015	0.9922	0.0028	1.0242	0.9899
SA0.5	5.0898	0.0011	0.9947	0.0044	0.9811	0.9823

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		เทมกิน		
	K_p (ล./ก.)	R^2	B (จูล/โมล)	A (ล./ก.)	R^2
SN	0.0024	0.9453	0.0516	0.1960	0.7902
SA0.1	0.0034	0.9872	0.0688	0.1818	0.7979
SA0.5	0.0041	0.9561	0.0811	0.2036	0.8056





ภาพที่ 4- 28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) SN (ข) SA0.1 (ค) SA0.5

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอนสรุไปได้ดังตารางที่ 4-17 โดยตัวดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งไอโซเทอมแบบแลงเมียร์บอกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว โดยค่า q_m มีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการดูดซับ เมื่อค่า q_m มีค่ามาก ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูง และค่า b เป็นค่าคงที่ของไอโซเทอม ถ้าค่า b มีค่าน้อย แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี

ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชบอกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบหลายชั้น ซึ่งค่า K เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ส่วนค่า $1/n$ ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการ พบว่าตัวดูดซับที่มีความชันเท่ากับ 1 อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่าความชันน้อยกว่า 1 อธิบาย

ถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ ค่าความชื้นมากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และเกิดการดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูง แต่จะเกิดการดูดซับได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการผลการทดลอง โดยทั่วไปไอโซเทอมที่มีความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส (Continuous Treatment) ส่วนไอโซเทอมที่มีความชันน้อยจะเหมาะสมที่จะใช้ในระบบบำบัดแบบทีละเท (Batch Treatment) (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

ไอโซเทอมแบบเทมกินนำไปใช้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ พลังงานการดูดซับจะลดลงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับ ซึ่งค่า B สัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ ส่วนค่า A สอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด

ตารางที่ 4- 17 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอม
SN	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
S400	ทุกแบบ ยกเว้นไอโซเทอมแบบเทมกิน
S500	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
S600	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
SA0.1	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
SA0.5	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าตัวดูดซับ SN ค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 0.9586 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและกรดพบว่าตัวดูดซับ S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5 ให้ค่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.2291, 2.8087, 2.6174, 2.6700 และ 5.0898 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้ค่าความจุในการดูดซับของตะกอนเพิ่มมากขึ้น โดยการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าความจุในการดูดซับสูงและมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นการกระตุ้นด้วยความร้อนควรใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ให้ค่าความจุ

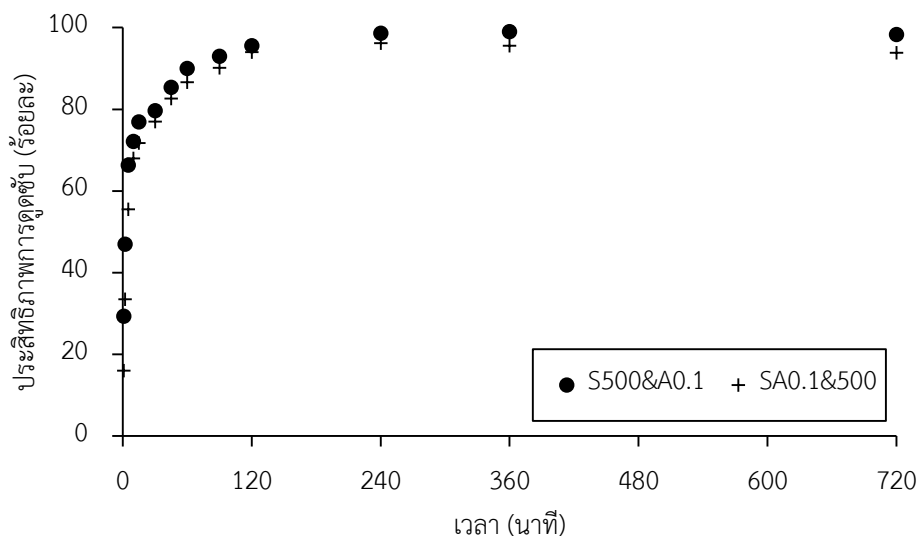
ในการดูดซับสูงสุด แต่การใช้กรด 0.1 และ 0.5 โมลาร์ ในการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้สารละลายที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเท่ากับ 6.5-6.6 และ 6.4-6.5 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายหลังใช้ตัวดูดซับ SA0.5 สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นกรด 0.1 โมลาร์ ในการศึกษาหัวข้อต่อไป

4.2.3 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีร่วมกัน

4.2.3.1 การดูดซับฟลูออไรด์

1) การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

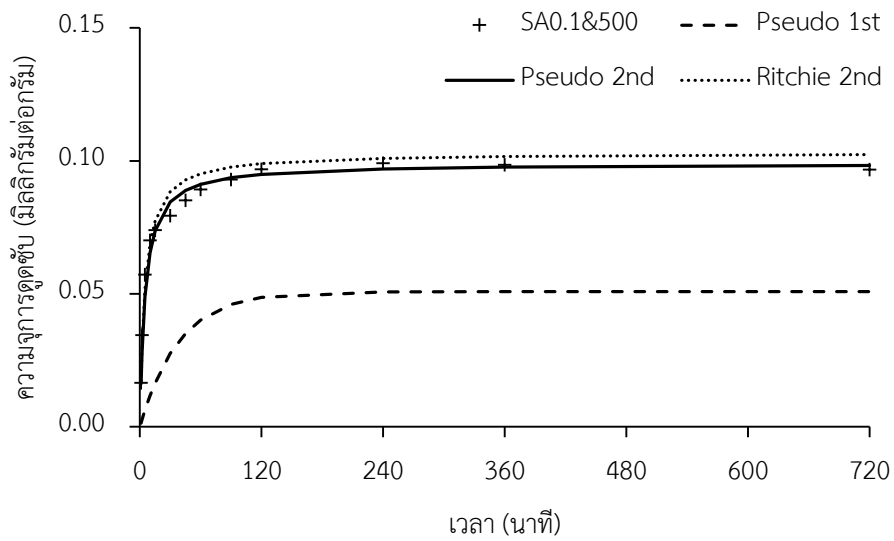
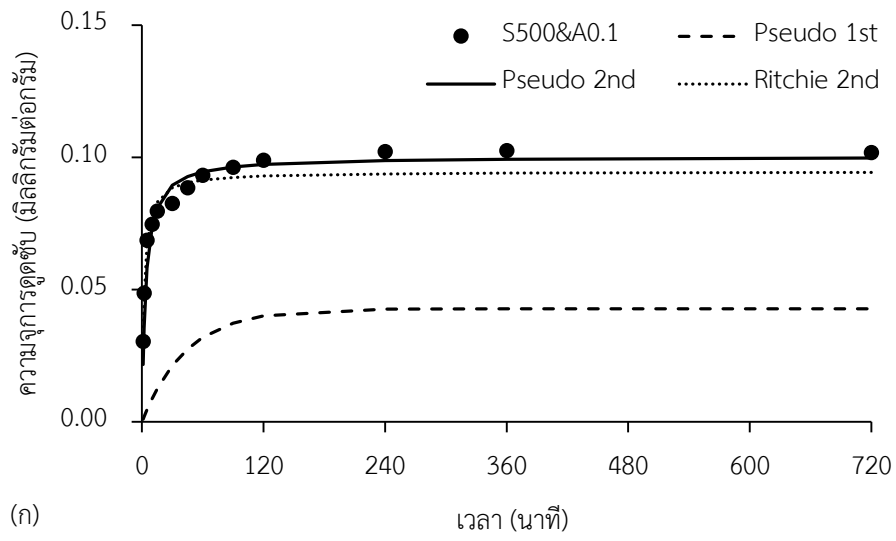
การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ที่ผ่านมาพบว่า การกระตุ้นตะกอนด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และการกระตุ้นตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด จึงนำมาศึกษาต่อโดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีร่วมกันด้วยการนำตะกอนไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (S500&A0.1) และตะกอนที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ตามด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (SA0.1&500) ซึ่งการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตะกอน S500&A0.1 และ SA0.1&500 ทำการทดลองในระบบที่ละเท โดยใช้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความเข้มข้นคงที่จะได้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและเวลาตามภาพที่ 4-29



ภาพที่ 4- 29 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วย ความร้อนและกรดร่วมกัน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับ S500&SA0.1 และ SA0.1&500 พบว่าตัวดูดซับเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีเดียว โดยใช้เวลาประมาณ 90 นาที ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้น การดูดซับจะเริ่มช้าลงและเริ่มคงที่จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยตัวดูดซับมีความคงรูป ไม่แตกออก

จากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน และสมการอันดับสองเหมือนของ Ritchie ดังภาพที่ 4-30 ซึ่ง แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4-18 โดยที่ค่าความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มาก ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์การดูดซับเป็นไปตามสมการอันดับสองเหมือน เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า



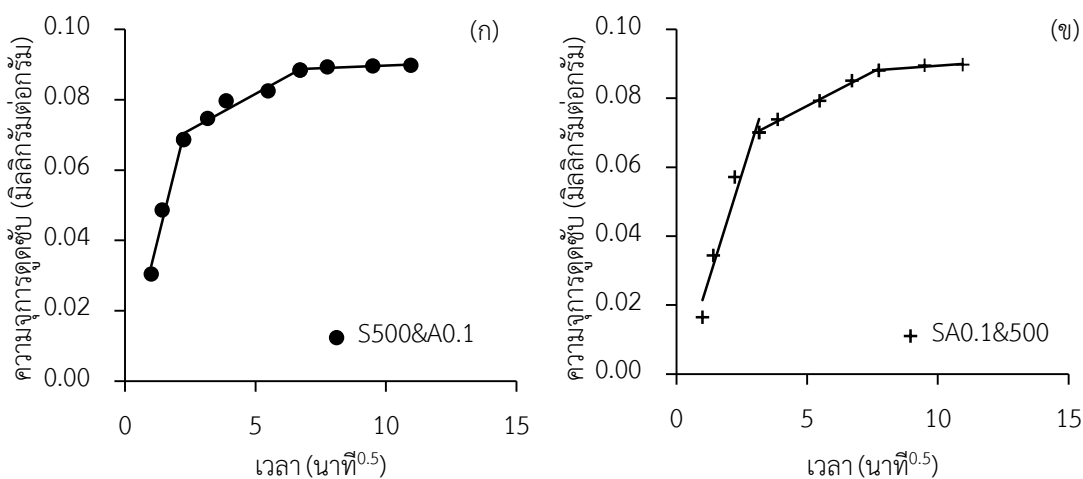
ภาพที่ 4- 30 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500

ตารางที่ 4- 18 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับในเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ่นด้วยความร้อนและการรวมกัน

ตัวดูดซับ	q (ทดลอง) (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order			Ritchie Second Order		
		R ²	K ₁ (นาที ⁻¹)	q _e (มก./ก.)	R ²	K ₂ (ก./มก.·น.)	q _e (มก./ก.)	R ²	K _r (ล./น.)	q _e (มก./ก.)
S500&A0.1	0.0989	0.9291	0.0229	0.0428	0.9985	2.7468	0.1002	0.9926	0.4841	0.0945
SA0.1&500	0.0968	0.9404	0.0260	0.0508	0.9984	0.0990	1.9620	0.9826	0.2010	0.1031

2) การศึกษากลไกการดูดซับ

ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-31 กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างฟลูออไรด์กับตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500 พบว่าตัวดูดซับทั้งหมดเกิดการดูดซับ 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการแพร่ผ่านฟลูออไรด์เข้าสู่ชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวดูดซับ ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนที่สองเป็นการแพร่เข้าถึงรูพรุนของตัวดูดซับ และขั้นตอนที่สามเป็นสมดุลของการดูดซับ โดยค่าความชันในช่วงที่ 2 ของการดูดซับมีค่าความชันต่ำกว่าความชันในช่วงแรก ดังนั้นขั้นตอนการแพร่ภายในอนุภาคจึงเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับขึ้น ผลวิเคราะห์ค่า K_{ip} แสดงในตารางที่ 4-19



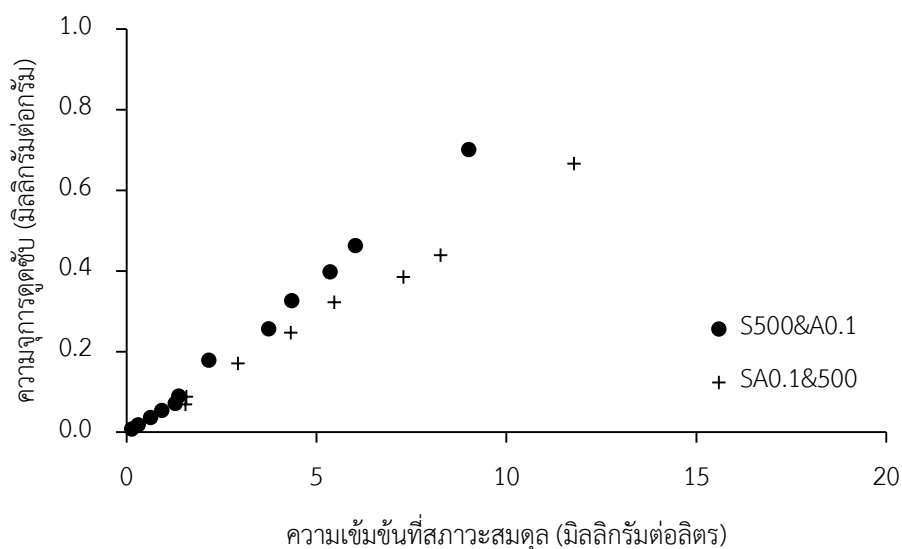
ภาพที่ 4- 31 กลไกการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 และ (ข) SA0.1&500

ตารางที่ 4- 19 ค่าคงที่กลไกการดูดซับฟลูออไรด์โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500

ตัวดูดซับ	ความชันที่ 1		ความชันที่ 2	
	K_{ip1}	C	K_{ip2}	C
S500&A0.1	0.0300	0.0027	0.0041	0.0613
SA0.1&500	0.0243	-0.0029	0.0039	0.0582

3) การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยทั้ง 2 วิธี โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500 โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทปที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ เริ่มต้นแตกต่างกัน และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ตามเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับจากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผ่านมา และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับ และจากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือ และค่ากรด-ด่าง (pH) หลังการดูดซับฟลูออไรด์แสดงในภาคผนวก ข.6 และจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามภาพที่ 4-32



ภาพที่ 4- 32 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรด

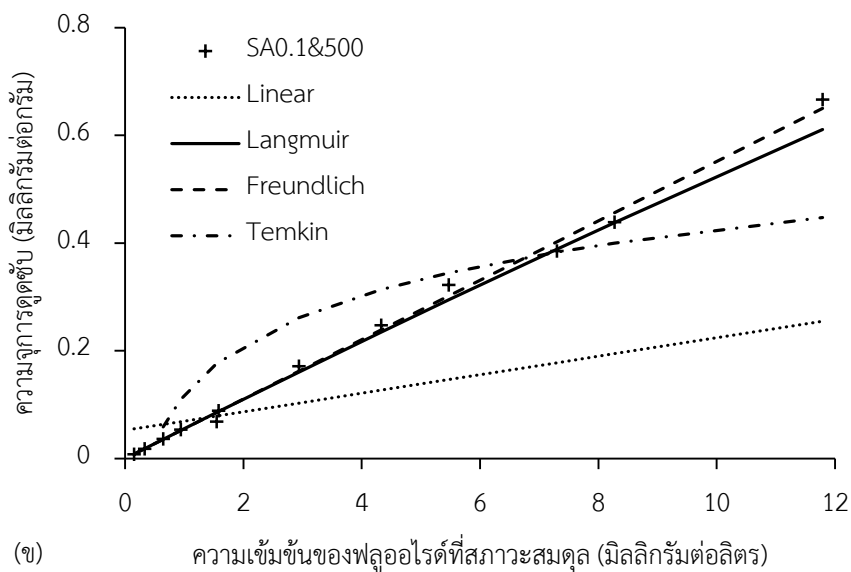
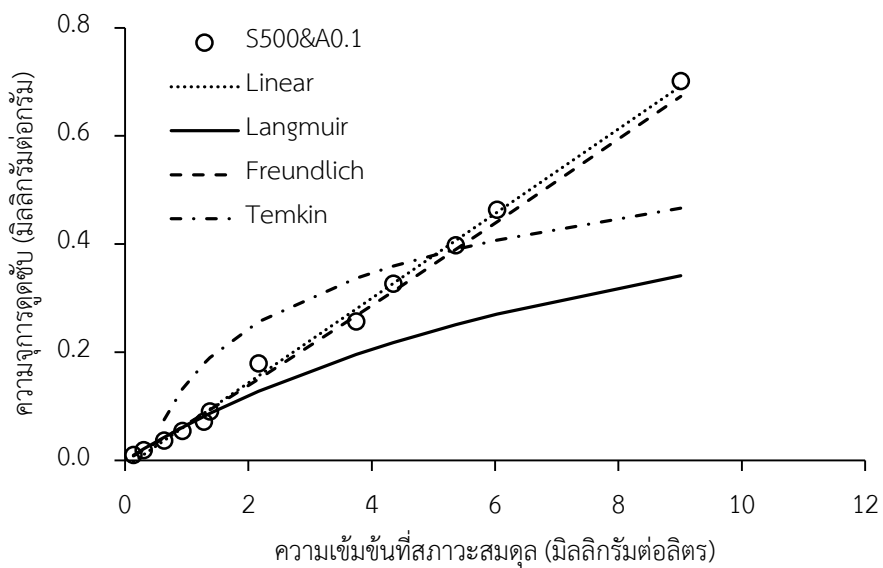
จากผลการทดลองพบว่า การกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและกรดร่วมกันให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีเดียว และการกระตุ้นด้วยความร้อนก่อนแล้วตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดส่งผลให้ความจุการดูดซับมากกว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดแล้วตามด้วยความร้อน เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นผิวมีรูพรุนมากขึ้น และตะกอนที่เผาไปแล้วจะประกอบด้วยสารออกไซด์ เช่น ซิลิกา เหล็ก ทำให้ตะกอนมีพื้นผิวเป็นประจุบวก และการแช่กรดจะทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายไปเกาะที่ผิวของตะกอนได้มากขึ้นและอาจมีการ

แทนที่ไอออนบวกอื่นๆ ได้ ดังนั้นตะกอนจึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับฟลูออไรด์ซึ่งเป็นประจุลบได้ดีขึ้น และจากข้อมูลสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอม ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-20 โดยที่ค่าความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับมีความเข้ากันได้กับสมการการดูดซับแบบ แลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 ที่ใกล้เคียง 1 โดยภาพที่ 4-33 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรุนดลิช และเทมกิน

ตารางที่ 4- 20 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	K (มก./ก.)(มก./ล.)	$1/n$	R^2
S500&A0.1	9.1713	0.0091	0.9987	0.0672	1.0713	0.9947
SA0.1&500	6.9816	0.0080	0.9993	0.0552	0.9995	0.9970

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		เทมกิน		
	K_p (ล./ก.)	R^2	B (จูล/โมล)	A (ล./ก.)	R^2
S500&A0.1	0.0838	0.9892	0.1501	2.6120	0.7443
SA0.1&500	0.0172	0.9384	0.1336	2.4137	0.7706



ภาพที่ 4- 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดไฮโดรคลอริก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-21 โดยตัวดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้ากัน 1 และมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4- 21 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม

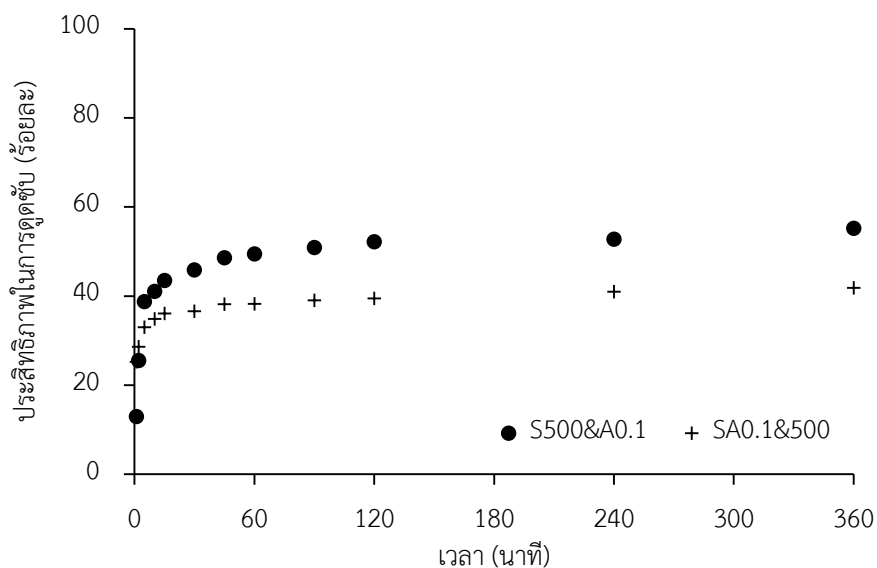
ตัวดูดซับ	ไอโซเทอม
S500&A0.1	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช
SA0.1&500	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช

จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500 มีค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 9.1713 และ 6.9816 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนและกรดรวมกันมีค่าความจุในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน และตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด ลำดับในการกระตุ้นมีผลต่อค่าความจุในการดูดซับ และความเป็นกรด-ด่างในสารละลายหลังการดูดซับที่เวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับเท่ากับ 6.5-6.7 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำบริโภคของกรมอนามัยที่กำหนดไว้เท่ากับ 6.5-8.5

4.2.3.2 การดูดซับไนเตรท

1) การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

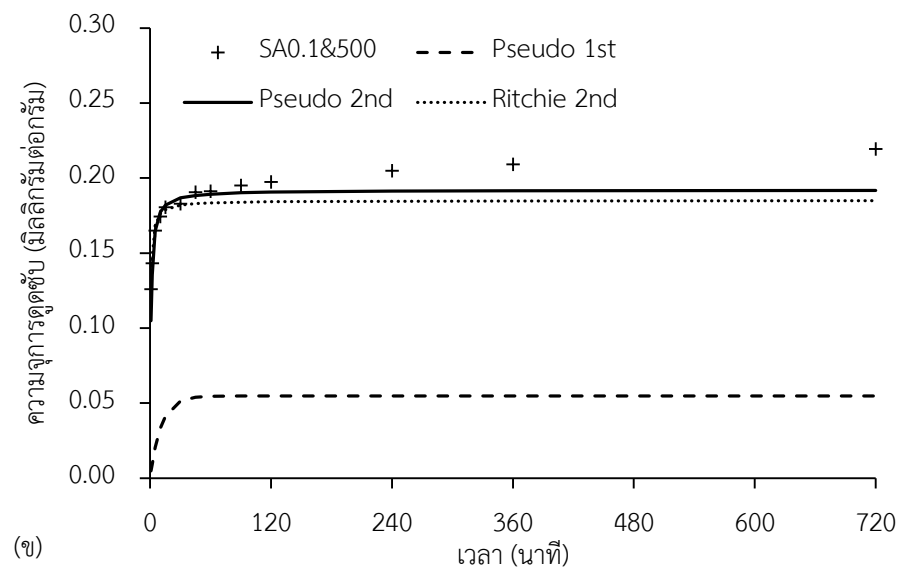
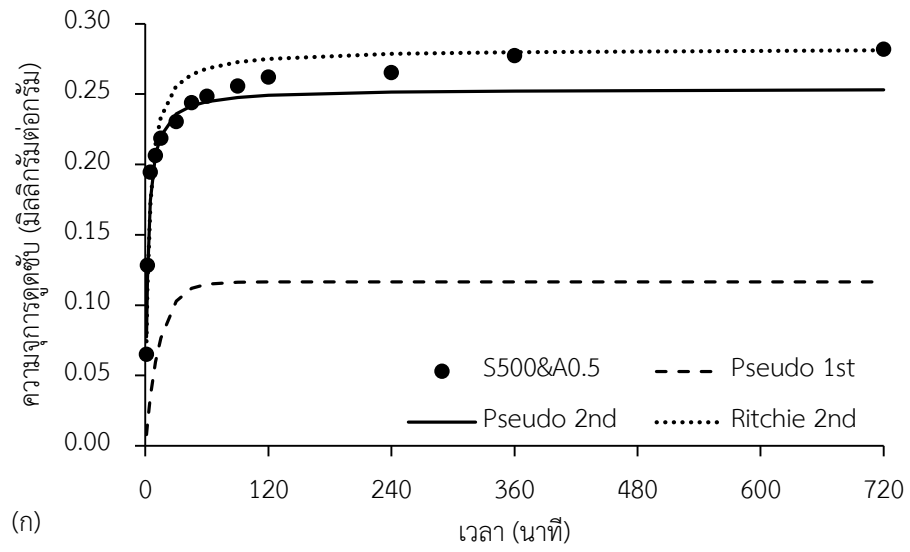
จากการศึกษาการดูดซับไนเตรทที่ผ่านมาพบว่าการกระตุ้นตะกอนด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และการกระตุ้นตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด จึงนำมาศึกษาต่อโดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีร่วมกันด้วยการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (S500&A0.1) และการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ และตามด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (SA0.1&500) ซึ่งการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทด้วยตะกอน S500&A0.1 และ SA0.1&500 ทำการทดลองในระบบที่ละเทที่มีค่าความเข้มข้นของไนเตรท 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นคงที่และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับเพื่อหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและเวลาตามภาพที่ 4-34



ภาพที่ 4- 34 จลนพลศาสตร์การกัดกร่อนในเตรทด้วยตัวกัดกร่อนที่
กระตุ้นด้วยวิธีทางกายและเคมีร่วมกัน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกัดกร่อนในเตรทด้วยตัวกัดกร่อน S500&SA0.1 และ SA0.1&500 พบว่าตัวกัดกร่อนเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าตัวกัดกร่อนที่กระตุ้นด้วยวิธีเดียว โดยใช้เวลาประมาณ 45 นาทีในการเข้าสู่สมดุลการกัดกร่อน ซึ่งการกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นการกัดกร่อนจะเริ่มช้าลงและเริ่มคงที่จนเข้าสู่สมดุลการกัดกร่อน โดยตัวกัดกร่อนมีความคงรูป ไม่แตกออกมาในสารละลาย

จากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การกัดกร่อนในเตรทของตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดไฮโดรคลอริกสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน และสมการอันดับสองเหมือนของ Ritchie ดังภาพที่ 4-35 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4-22 โดยความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การกัดกร่อนพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มาก ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์การกัดกร่อนเป็นไปตามสมการอันดับสองเหมือน เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า



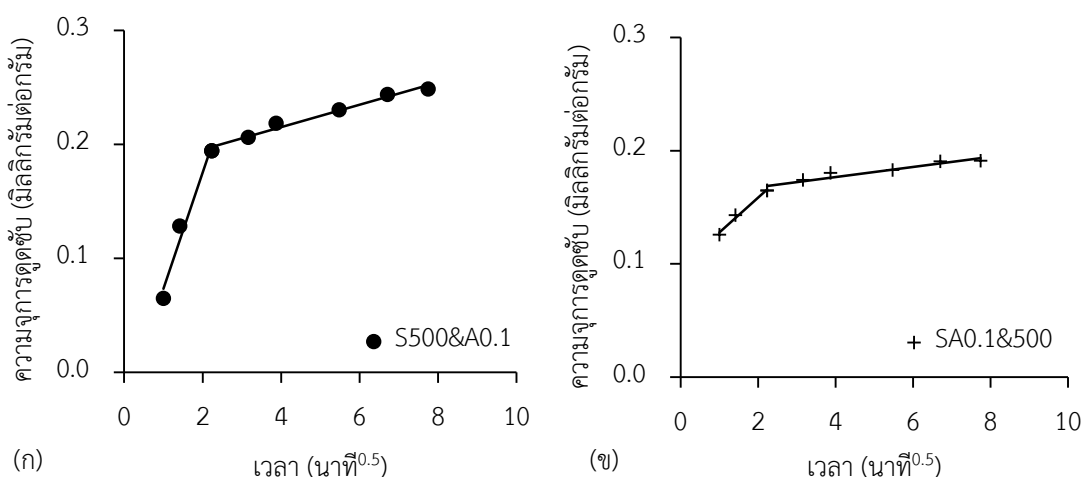
ภาพที่ 4- 35 เปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500

ตารางที่ 4- 22 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับไบนารีด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรด

ตัวดูดซับ	q (ทดลอง) (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order			Ritchie Second Order		
		R ²	K ₁ (นาที ⁻¹)	q _e (มก./ก.)	R ²	K ₂ (ก./มก.·น.)	q _e (มก./ก.)	R ²	K _r (ล./น.)	q _e (มก./ก.)
S500&A0.1	0.2486	0.9192	0.0718	0.1165	0.9988	1.7315	0.2538	0.9695	0.3186	0.2823
SA0.1&500	0.1911	0.9188	0.0927	0.0548	0.9995	6.2832	0.1919	0.9740	2.0185	0.1850

2) การศึกษากลไกการดูดซับ

ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-36 กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างไนเตรทกับตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500 พบว่าตัวดูดซับทั้งหมดเกิดการดูดซับ 2 ขั้นตอน การดูดซับไนเตรทในขั้นแรก (k_{ip1}) เกิดขึ้นมากกว่าในขั้นที่สอง (k_{ip2}) โดยในขั้นตอนแรกเป็นการแพร่ผ่านของไนเตรทเข้าสู่ชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับแสดงให้เห็นเป็นความชันแรก ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณไนเตรทอยู่มาก ในขณะที่ขั้นที่สองเป็นสมดุลของการดูดซับเกิดจากความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายมีค่าลดต่ำลง เป็นผลของการแพร่ภายในรูพรุนโดยผลวิเคราะห์ค่า K_{ip} แสดงในตารางที่ 4-23



ภาพที่ 4- 36 กลไกการดูดซับไนเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ

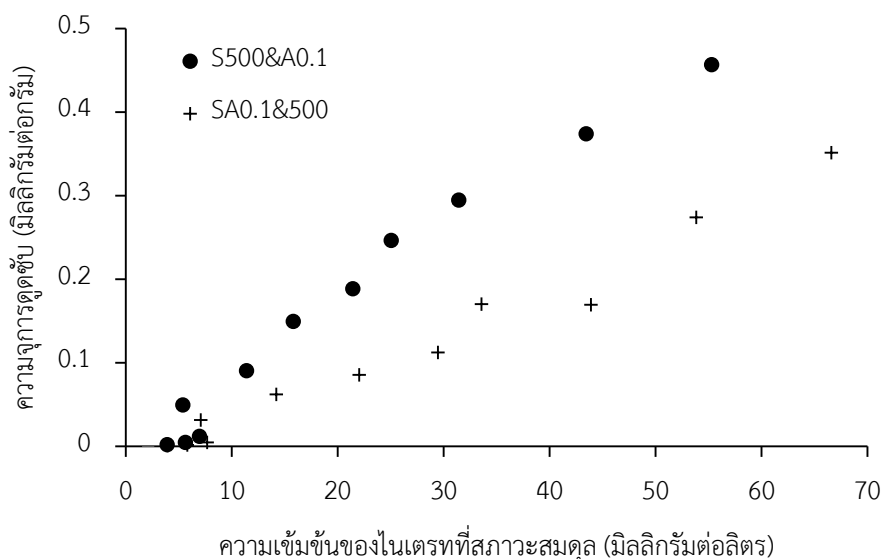
(ก) S500&A0.1 และ (ข) SA0.1&500

ตารางที่ 4- 23 ค่าคงที่กลไกการดูดซับไนเตรทโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500

ตัวดูดซับ	ความชันที่ 1		ความชันที่ 2	
	K_{ip1}	C	K_{ip2}	C
S500&A0.1	0.1014	-0.0278	0.0098	0.1760
SA0.1&500	0.0307	0.0970	0.0045	0.1588

3) การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทด้วยตะกอนน้ำประปาที่ทำการกระตุ้นด้วยทั้ง 2 วิธี โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500 ทำการทดลองในระบบที่ละเทโดยใช้ความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นแตกต่างกัน ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับตามการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ และจากการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือ และค่ากรด-ด่าง (pH) หลังการดูดซับไนเตรทแสดงในภาคผนวก ข.6 และจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามภาพที่ 4-37



ภาพที่ 4- 37 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกระตุ้นร่วมกัน

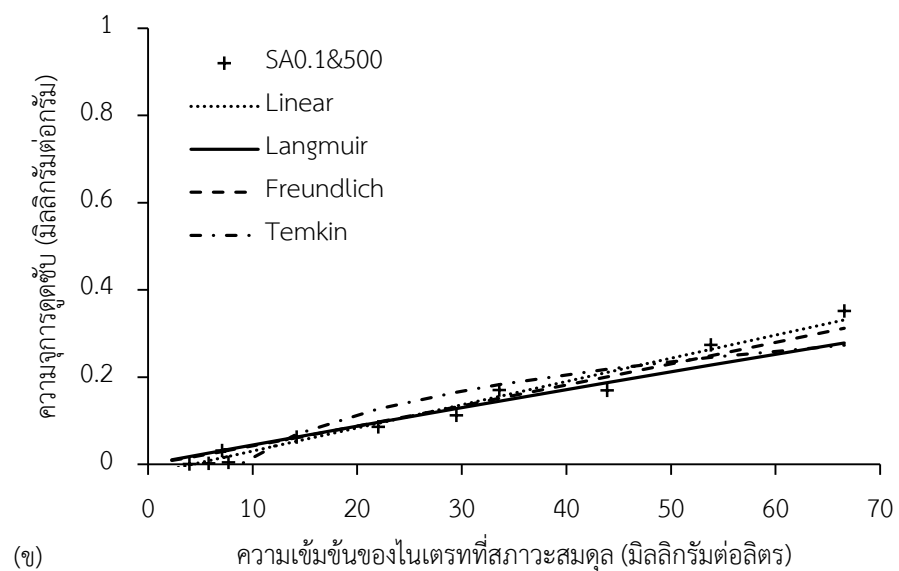
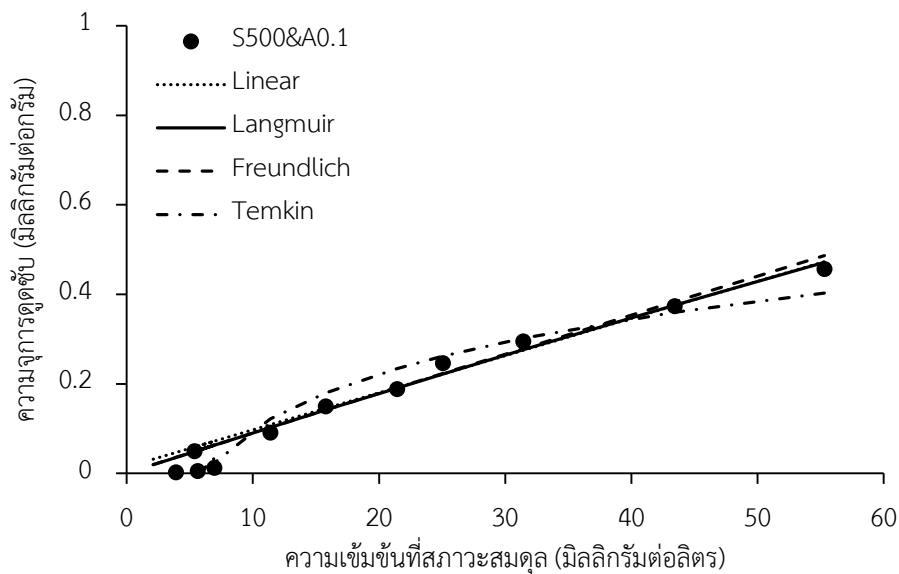
จากผลการทดลองพบว่า การกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและกระตุ้นร่วมกันให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีเดียว และพบว่า การกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนก่อนแล้วตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดส่งผลให้ความจุการดูดซับมากกว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดแล้วตามด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อน เช่นเดียวกับการดูดซับฟลูออไรด์ และจากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ของตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากัน

ได้กับสมการไอโซเทอม ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-24 โดยที่ค่าความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับมีความเข้ากันได้กับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่า R^2 ที่ใกล้เคียง 1 โดยภาพที่ 4-38 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรุนดลิช และเทมกิน

ตารางที่ 4- 24 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับในตรรก โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	q_m (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2	K (มก./ก.)(มก./ล.)	$1/n$	R^2
S500&A0.1	5.7670	0.0020	0.9959	0.0091	0.9894	0.9923
SA0.1&500	4.0485	0.0011	0.9914	0.0037	0.9434	0.9744

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		เทมกิน		
	K_p (ล./ก.)	R^2	B (จูล/โมล)	A (ล./ก.)	R^2
S500&A0.1	0.0150	0.9602	0.1777	0.1714	0.9683
SA0.1&500	0.0053	0.9604	0.1320	0.1187	0.7964



ภาพที่ 4- 38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ (ก) S500&A0.1 (ข) SA0.1&500

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอนที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดไฮโดรคลอริก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-25 โดยตัวดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้ากัน 1 และมีค่าใกล้เคียงกัน

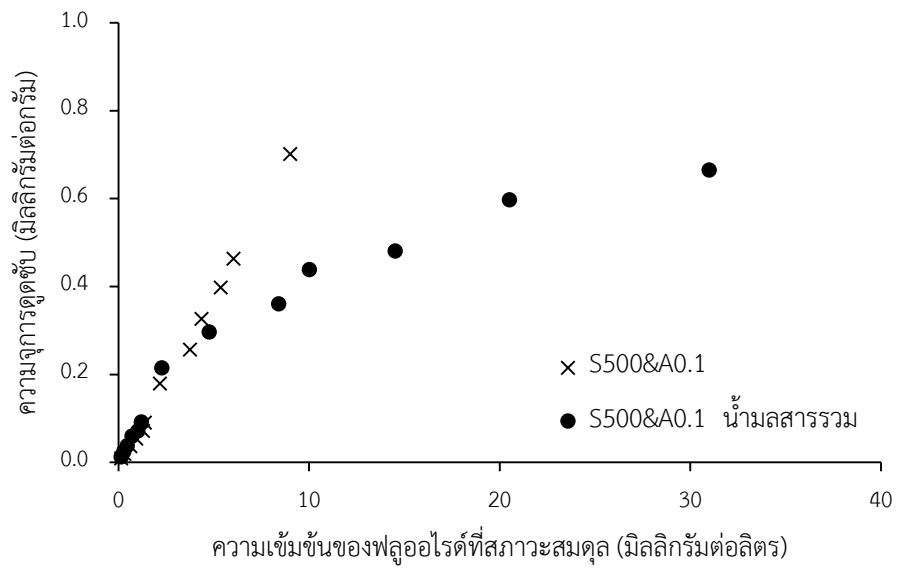
ตารางที่ 4- 25 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอม
S500&A0.1	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช
SA0.1&500	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

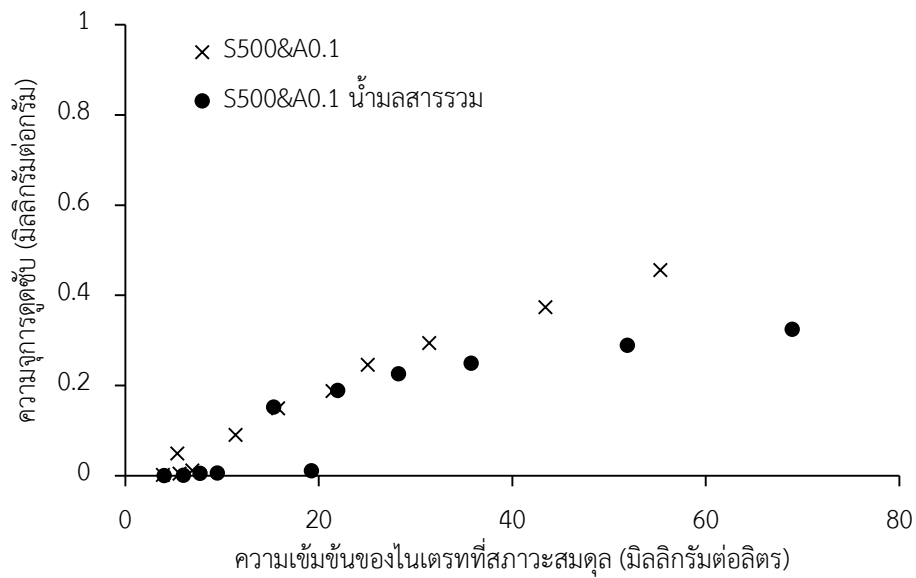
จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าตัวดูดซับ S500&A0.1 และ SA0.1&500 มีค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 5.7670 และ 4.0485 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนและกรรร่วมกันมีค่าความจุในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน และตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรด ลำดับในการกระตุ้นส่งผลต่อค่าความจุในการดูดซับ และค่าความเป็นกรด-ต่างในสารละลายหลังการดูดซับที่เวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับอยู่ในช่วง 6.6-6.7 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่กำหนดไว้เท่ากับ 6.5-8.5

4.2.4 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม

การศึกษากระบวนการดูดซับในน้ำสังเคราะห์มลสารรวมได้เลือกใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 ซึ่งทำการทดลองในระบบที่ละเท โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองสมดุลการดูดซับน้ำสังเคราะห์มลสารเดี่ยว ผลการทดลองดังภาพที่ 4-39 พบว่าตัวดูดซับ S500&A0.1 ที่ความเข้มข้นต่ำมีความจุในการดูดซับไม่แตกต่างจากการดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว แต่ความจุในการดูดซับฟลูออไรด์เริ่มลดลงที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป เนื่องจากที่ความเข้มข้นนี้ ตัวดูดซับเริ่มเกิดการดูดซับไนเตรทขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sujana และคณะ (1998) และ Vinitnantharat และคณะ (2010) ซึ่งพบว่าตัวดูดซับดูดซับฟลูออไรด์ได้น้อยลงเมื่ออยู่ในสถานะที่มีไนเตรท เนื่องจากเกิดการแข่งขันในการแย่งชิงพื้นที่ดูดซับบนพื้นผิวตะกอน และผลการทดลองการดูดซับไนเตรทในน้ำมลสารรวมดังภาพที่ 4-40 โดยพบว่าตัวดูดซับ S500&A0.1 มีความจุในการดูดซับน้อยลงเช่นเดียวกับการดูดซับฟลูออไรด์ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข.7



ภาพที่ 4- 39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ S500&A0.1 ในน้ำกลั่นและน้ำรวม



ภาพที่ 4- 40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับไนเตรท โดยใช้ S500&A0.1 ในน้ำกลั่นและน้ำรวม

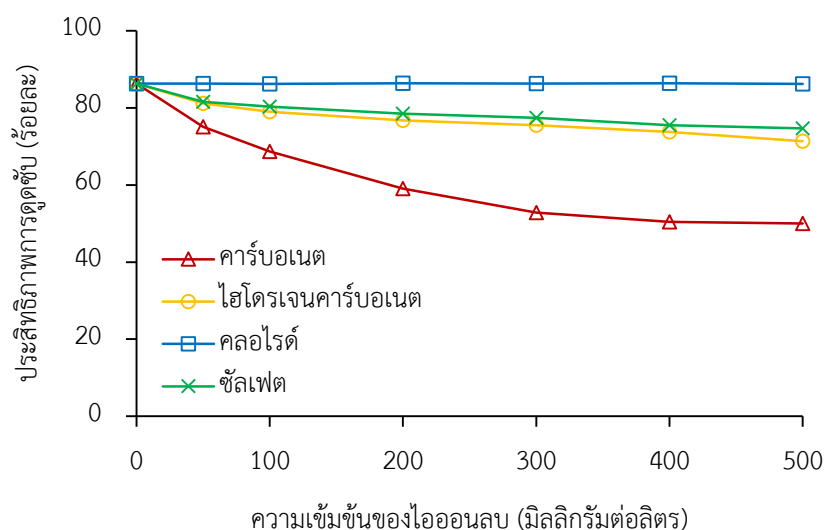
4.3 ผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากตะกอน

โดยทั่วไปแหล่งน้ำธรรมชาติจะพบไอออนต่างๆ อื่นๆ อีก ซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากตะกอน จึงทำการศึกษาผลของไอออนลบและไอออนบวก อื่นๆ เพิ่มเติม โดยไอออนลบที่เลือกใช้ ได้แก่ คาร์บอเนต ไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซัลเฟต คลอไรด์ และไอออนบวกที่เลือกใช้ ได้แก่ โซเดียม และแคลเซียม ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรท แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4-41 และ 4-42 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ และไนเตรทเมื่อมีไอออนลบที่ความเข้มข้นต่างๆ และภาพที่ 4-43 และ 4-44 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ และไนเตรทเมื่อมีไอออนบวกที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์และไนเตรทที่เหลือหลังการดูดซับแสดงในภาคผนวกที่ ข.8

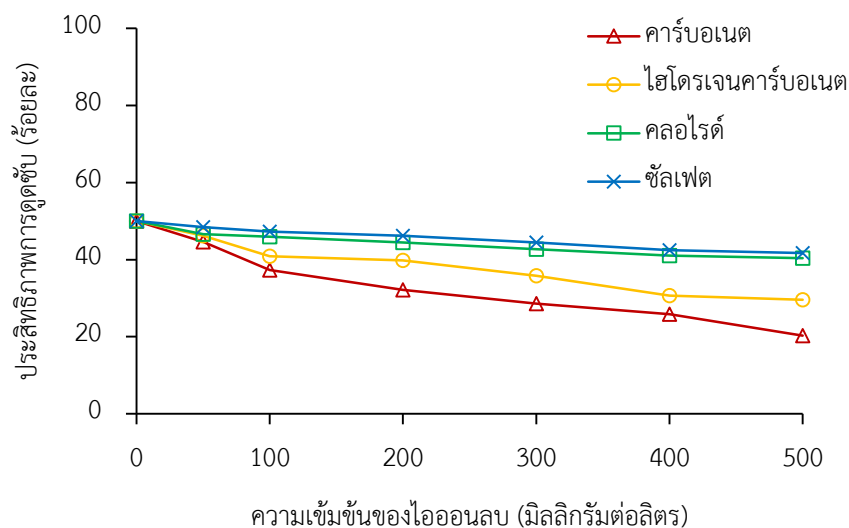
จากการทดลองพบว่า ไอออนลบที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรท โดยประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงเมื่อมีไอออน คาร์บอเนต ไฮโดรเจนคาร์บอเนต และซัลเฟต ตามลำดับ ส่วนไอออนคลอไรด์ไม่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของไอออนลบเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงจากร้อยละ 91.04 เป็นร้อยละ 52.05 เมื่อมีคาร์บอเนต ส่วนไฮโดรเจนคาร์บอเนต และซัลเฟต ทำให้การดูดซับฟลูออไรด์ลดลงใกล้เคียงกัน คือจากร้อยละ 91.04 เป็นร้อยละ 71.35 และ 74.67 ตามลำดับ ส่วนการดูดซับไนเตรทมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีไอออน คาร์บอเนต ไฮโดรเจนคาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟต ตามลำดับ ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของไอออนลบเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทลดลงจากร้อยละ 50.04 เป็นร้อยละ 20.32, 29.60, 40.38 และ 41.75 ตามลำดับ

การที่ไอออนแต่ละตัวมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทต่างกันเนื่องจากค่า Ionic Strength และ Ion activity ถ้ามีค่ามากจะมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งไอออนคาร์บอเนตมีความว่องไวในการจับไอออนบวกที่ตัวดูดซับได้เร็วกว่าฟลูออไรด์และไนเตรทจึงทำให้การดูดซับลดลง (Vinitnantharat และคณะ, 2010) ความสามารถในการยึดติดของไอออนต่างๆ ที่ตัวดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ในการละลายน้ำ ขนาดของไอออน ถ้าไอออนที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปในรูพรุนได้ง่ายกว่าไอออนขนาดใหญ่ กรณีที่เกิดการแทรกตัวเข้าไปของไอออนลบภายในรูพรุน หรือเป็นการดูดซับแบบกายภาพโดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างฟลูออไรด์และไนเตรทกับผิวหน้าของตะกอนจะเป็นแรง

ค่อนข้างอ่อนหรือแรงแวนเดอวาลส์ (Vander waal's force) นอกจากนี้การที่ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทลดลงยังขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำ โดยที่สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทจะลดลง



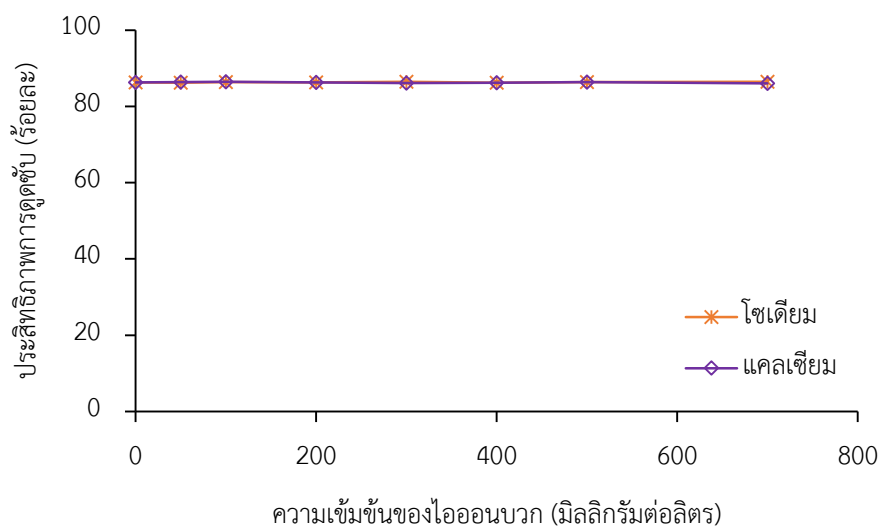
ภาพที่ 4- 41 แสดงผลของไอออนลบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์



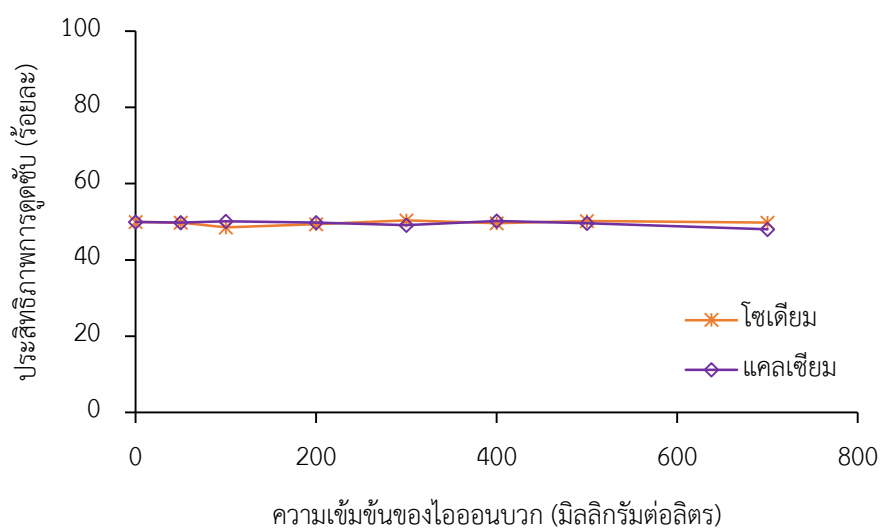
ภาพที่ 4- 42 แสดงผลของไอออนลบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท

ส่วนผลการศึกษาไอออนบวกต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทของตัวดูดซับ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมและแคลเซียมไอออนจาก 0 ถึง 700 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า

ไอออนบวกไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทเปลี่ยนแปลง ดังนั้นไอออนโซเดียมและแคลเซียมที่มีอยู่ในน้ำจึงไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรท แต่ทั้งนี้อาจทำให้ฟลูออไรด์ลดลงได้เนื่องจากการตกตะกอนของโซเดียมและแคลเซียมฟลูออไรด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และความเข้มข้นของไอออนในน้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 4- 43 แสดงผลของไอออนบวกต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์



ภาพที่ 4- 44 แสดงผลของไอออนบวกต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท

4.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับเพิ่มเติม

ตัวดูดซับที่นำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีในหัวข้อนี้ คือ ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อน 500 องศาเซลเซียสและตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทมากที่สุด โดยทำการศึกษาลักษณะฟังกชันบนพื้นผิว พื้นผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน และประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มเติม

1) การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

จากการศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ SA1 ในหัวข้อ 4.1.4 และจากการศึกษาการดูดซับที่ผ่านมาพบว่าการใช้ความเข้มข้นกรดมากไปทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของตัวดูดซับ พื้นผิวลดลง ตัวดูดซับแตกออกง่าย ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ S500&A0.1 โดยใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับไนโตรเจน ที่สภาวะอุณหภูมิ 77.35 ซึ่งสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน คือ สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และสมการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-26

ตารางที่ 4- 26 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ S500&A0.1

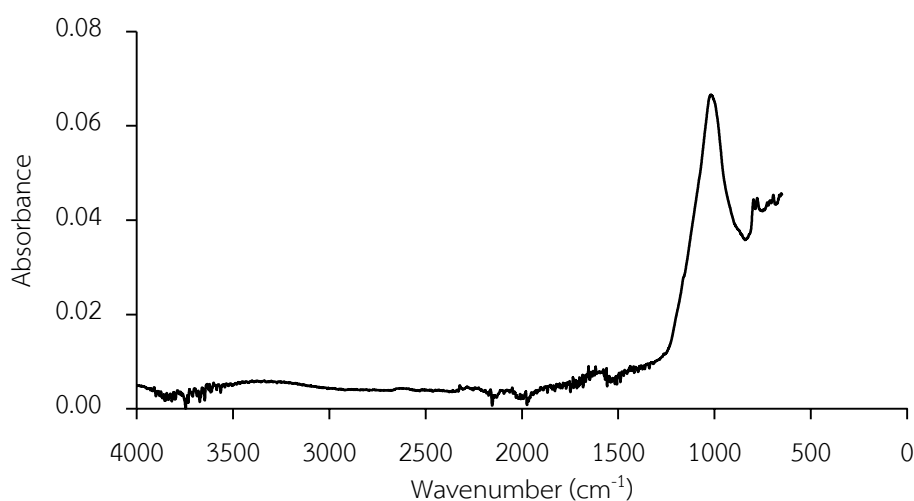
พารามิเตอร์	S500&A0.1
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	109.301
ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.277
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	86.114

ผลการวิเคราะห์พบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและกรดความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับส่งผลให้ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น 6.3 และ 1.76 เท่า ตามลำดับ เมื่อเมื่อปรับปรุงตัวดูดซับด้วยความร้อนทำให้มีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น เนื่องจากภายหลังการเผามีการระเหยของน้ำและทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ในโครงสร้างตะกอนเกิดการสลายตัวไปทำให้มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก และการกระตุ้นด้วยกรด ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเข้าไปแทนที่ประจุบวกอื่นๆ เช่น Al หรือ Mn ในชั้นโครงสร้างของตัวดูดซับ ซึ่งมีขนาดประจุ

(ionic size) ใหญ่กว่า H^+ ทำให้เมื่อปรับปรุงตัวดูดซับด้วยกรดจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (Benguella และ Yacouta-Nour, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kul และ Koyuncu (2010) ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในการปรับปรุงพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

2) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

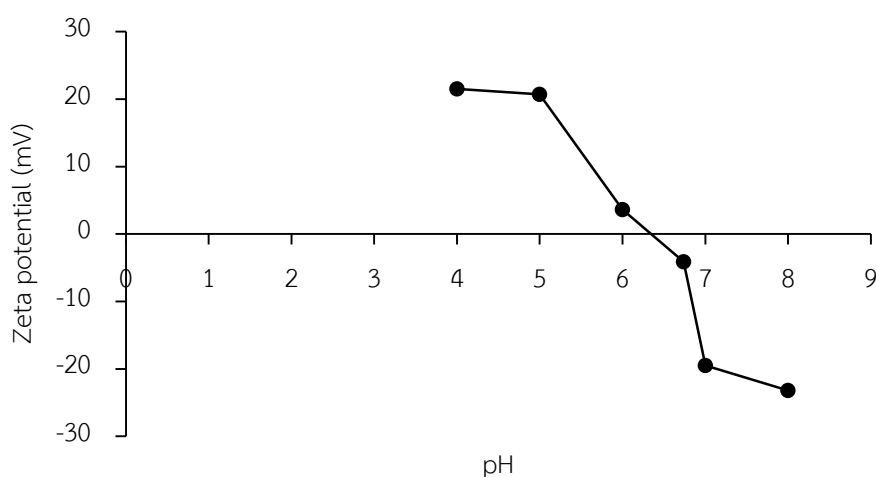
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500&A0.1 ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-45 พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏจากการวิเคราะห์มีดังนี้ ที่ความยาวคลื่น 3788 cm^{-1} แสดงถึง OH จาก SiO_4 (Mena-duran และคณะ, 2007) ความยาวคลื่น 3696 cm^{-1} และ 3660 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (O-H groups) (Nicolini และคณะ, 2009; Madejova และ Komadel, 2001) ความยาวคลื่น 3400 cm^{-1} แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) และโมเลกุลของน้ำรวมกัน และแสดงถึง Al-OH (Gulnaz และคณะ, 2006) ช่วงความยาวคลื่น $1750-1550\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลพันธะคู่ (C=O) (Thuy, 2006) ความยาวคลื่น 1020 cm^{-1} แสดงถึงพันธะของ Si-O และที่ความยาวคลื่น $700-800\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง SiO_2 และ Al-O (Bekele และคณะ, 2014) ในกรณีของตัวดูดซับ S500&A0.1 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ SN ในหัวข้อ 4.1.5 พบว่ามีช่วงคลื่นที่ $3600-3800\text{ cm}^{-1}$, $1750-1550\text{ cm}^{-1}$ และ 779 cm^{-1} เกิดขึ้นใหม่แสดงถึงหมู่ OH และ C=O ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของกรด และพบว่าช่วงคลื่น 3400 cm^{-1} มีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ลดลงซึ่งแสดงถึงหมู่ O-H (stretching) จากการระเหยของน้ำออกไปหลังการเผาตะกอน



ภาพที่ 4- 45 สเปกตรัม FT-IR ของตัวดูดซับ S500&A0.1

3) การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว (Surface charge)

การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Surface charge) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dynamic light scattering (DLS) โดยเป็นการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ออกมา ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวกับค่าพีเอชดังภาพที่ 4-46 ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับ S500&A0.1 มีค่า pH_{zpc} เท่ากับ 6.75 ซึ่งถ้าสารละลายมีค่าพีเอชน้อยกว่า pH_{zpc} ส่งผลให้เกิดประจุบวกบนพื้นผิวตัวดูดซับขึ้น ซึ่งจะดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทที่มีประจุลบได้มากขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า



ภาพที่ 4- 46 ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ S500&A0.1

4.5 การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ

ตะกอนที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับในน้ำอาจมีการชะละลายของมลสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในตะกอนออกมาในน้ำ จึงต้องตรวจสอบคุณภาพน้ำหลังใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับตามเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4-27 ซึ่งพบว่าการตรวจสอบคุณภาพน้ำเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นมีการชะละลายของไอออนต่างๆ ออกมาอยู่ในน้ำมากที่สุด และตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดรวมกันมีการชะละลายของไอออนต่างๆ เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4- 27 คุณภาพน้ำเบื้องต้นหลังใช้ตะกอนเป็นต้นดูดซับ

ตัวดูดซับ	พารามิเตอร์										
	pH	TDS (mg/L)	F (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)
SN	6.5-6.7	288.19	0.05	24.12	3.03	1.28	40.28	0.07	1.14	1.58	1.02
S300	6.6-6.7	258.03	0.12	22.01	2.11	0.98	54.03	1.33	1.02	1.16	0.14
S400	6.6-6.7	178.35	0.08	8.04	0.21	2.01	40.19	n.a.	0.36	0.93	0.45
S500	6.5-6.7	87.24	n.a.	6.67	0.24	0.11	42.32	n.a.	0.49	0.74	0.43
S600	6.5-6.7	95.91	n.a.	3.09	0.27	n.a.	33.56	n.a.	0.61	0.71	0.13
S700	6.6-6.7	104.51	n.a.	5.31	n.a.	0.15	40.23	1.66	0.56	0.78	0.36
SA0.1	6.5-6.6	112.73	0.07	6.03	1.32	n.a.	10.37	n.a.	0.51	0.65	0.55
SA0.5	6.3-6.5	120.41	0.10	8.01	0.94	n.a.	n.a.	0.25	0.63	0.51	0.18
S500&A0.1	6.5-6.6	53.54	n.a.	3.23	0.10	0.08	15.93	0.14	0.57	0.46	0.22
SA0.1&500	6.5-6.6	67.28	n.a.	2.31	0.07	1.25	24.20	n.a.	0.43	0.31	0.20
DI water	6.6-6.8	0.01	0.02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ค่ามาตรฐาน	6.5-6.8	750	0.7	250	45	-	200	-	50	75	-

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการนำของเสีย คือ ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับมลสารในน้ำในระบบที่ละเท โดยนำตะกอนมาปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อน (S300-S700) กรดไฮโดรคลอริก (SA0.1-SA1) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SB0.1-SB1) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ กลไกการดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับของฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยว ศึกษาการดูดซับในน้ำมลสารรวมผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำต่อการดูดซับ และการชะละลายของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าตัวดูดซับ S500&A0.1 มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทที่ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์และไนเตรทที่เวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 91.04% และ 50.04% ตามลำดับ และสามารถสรุปผลการทดลองอื่นๆ ได้ดังนี้

5.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

จากการศึกษาปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับที่กระตุ้นและไม่กระตุ้นพบว่าปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ใกล้เคียงกัน ยกเว้นตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะพบธาตุโซเดียมอยู่ประมาณ 2.22% โดยปริมาณของแร่ธาตุที่พบว่าเป็นองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ตามลำดับ ลักษณะของโครงสร้างผลึกตัวดูดซับที่กระตุ้นและไม่กระตุ้นพบว่ามีลักษณะโครงสร้างของ Quartz alpha ($\alpha\text{-SiO}_2$) อะลูมิเนียมไฮดรเจนซิลิเกต และอะลูมิเนียมออกไซด์ และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ พบหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching หมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) หมู่ Al-OH และหมู่ซิลินอล (Si-O₂)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับพบว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิว 62.13 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อนำไปกระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวลดลง 1.5 เท่า แต่ทำให้ขนาดรูพรุนเพิ่ม 6.5 เท่า และตัวดูดซับ S500&A0.1 มีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น 6.3 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นการกระตุ้นด้วยกรดความเข้มข้น 0.1

โมลาร์ทำให้พื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของกรดที่มากไปทำให้พื้นที่ผิวตัวดูดซับลดลง ส่วนการกระตุ้นต่างพบว่ามีลักษณะไม่แตกต่างจากตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้น

ผลการศึกษาประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (pH_{zpc}) ของตัวดูดซับ S500 เท่ากับ 6.8 และ ตัวดูดซับ S500&A0.1 เท่ากับ 6.75 ซึ่งมีความมากกว่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับแสดงประจุบวกมากกว่าประจุลบ ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับไอออนลบได้ดี

ดังนั้นตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ และการกระตุ้นตะกอนช่วยปรับปรุงพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนให้มากขึ้น ตะกอนจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้มากขึ้น

5.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์พบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้ ยกเว้นตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยต่าง โดยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ซึ่งเร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นที่ใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งหมดเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับในเตรทพบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับในเตรทในน้ำได้ โดยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดใช้เวลาประมาณ 60 นาที ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ซึ่งเร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นที่ใช้เวลาประมาณ 90 นาที ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งหมดเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน

5.3 การศึกษากลไกการดูดซับ

การศึกษากลไกการดูดซับฟลูออไรด์พบว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นเกิดการดูดซับ 2 ขั้นตอน ส่วนตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนและกรดเกิดการดูดซับ 3 ขั้นตอน โดยมีขั้นตอนการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ และการกระตุ้นตัวดูดซับช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการดูดซับให้มากขึ้น

การศึกษากลไกการดูดซับไนเตรทพบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นและไม่ได้กระตุ้นเกิดการดูดซับ 2 ขั้นตอน โดยการดูดซับไนเตรทในขั้นแรกเกิดขึ้นมากกว่าในขั้นที่สอง เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวและรูพรุนไม่เอื้อต่อการดูดซับไนเตรท

5.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟลูออไรด์พบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีที่สุด โดยมีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมทุกแบบยกเว้นแบบไอโซเทอมแบบเทมกิน โดยคำนวณค่าความจุการดูดซับสูงสุดได้ 5.1565 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีที่สุด โดยมีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยคำนวณค่าความจุการดูดซับสูงสุดได้ 4.0264 มิลลิกรัมต่อกรัม

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของไนเตรทพบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สามารถดูดซับไนเตรทได้ดีที่สุด โดยมีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยคำนวณค่าความจุการดูดซับสูงสุดได้ 2.8087 และ 2.6700 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5.5 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารเดี่ยวด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีร่วมกัน

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์และจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรท พบว่าใช้เวลา 90 และ 45 นาที ตามลำดับ ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ซึ่งเร็วกว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยความร้อนหรือกรดเพียงวิธีเดียว โดยผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งหมดเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน

การศึกษากลไกการดูดซับฟลูออไรด์พบว่าตัวดูดซับทั้งหมดเกิดการดูดซับ 3 ขั้นตอน โดยมีขั้นของการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนกลไกการดูดซับไนเตรทพบว่าเกิดการดูดซับ 2 ขั้นตอน โดยการดูดซับไนเตรทในขั้นแรกเกิดขึ้นมากกว่าในขั้นที่สอง เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวและรูพรุนไม่เอื้อต่อการดูดซับไนเตรท

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์และไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทพบว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนและกรรร่วมกันทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้มากขึ้นกว่าการกระตุ้นเพียงวิธีเดียว โดยการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยความร้อนก่อนแล้วตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดสามารถดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทได้ดีที่สุด โดยมีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช โดยคำนวณค่าความจุการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทสูงสุดได้ 9.1713 และ 5.7670 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

5.6 การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม

การศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม พบว่าการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 และการดูดซับไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับ S500&A0.1 ในน้ำมลสารรวมมีการดูดซับลดลงจากการดูดซับในน้ำมลสารเดี่ยว เนื่องจากเกิดการแข่งขันในการแย่งชิงพื้นที่ดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

5.7 การศึกษาผลของความเข้มข้นไอออนอื่นๆ ในน้ำที่มีต่อการดูดซับ

การศึกษาผลของไอออนลบในน้ำ ได้แก่ ไอออนคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟต ที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงเมื่อมีไอออนคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และซัลเฟต ตามลำดับ และไอออนคลอไรด์ไม่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ และการดูดซับไนเตรทลดลงเมื่อมีไอออนคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟต ตามลำดับ

การศึกษาผลของไอออนบวกในน้ำ ได้แก่ โซเดียมและแคลเซียม ที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าโซเดียมและแคลเซียมที่มีอยู่ในน้ำไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรท

5.8 การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับ

การศึกษาการชะละลายของตัวดูดซับโดยการตรวจสอบคุณภาพน้ำหลังใช้ตะกอนเป็นตัวดูดซับตามเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ พบว่าการตรวจสอบคุณภาพน้ำเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภคของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์โดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำ การกระตุ้นตะกอนด้วยความร้อนและกรดไฮโดรคลอริกที่

อุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมช่วยปรับปรุงพื้นที่ผิวดูดซับทำให้ดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทได้มากขึ้น โดยการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตะกอนเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ การแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งการนำตะกอนกลับมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับนี้ เป็นแนวทางทางเลือกหนึ่งในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น และลดภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

6.1 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์

จากผลการศึกษาการนำตะกอนที่เป็นของเสียจากโรงผลิตน้ำประปากลับมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำในระบบที่ละเทสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. สามารถนำตะกอนไปใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำได้ แต่เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาขั้นต้นของการนำตะกอนมาใช้เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำ ดังนั้นการนำไปใช้ในน้ำเพื่อการบริโภคและอุปโภค จำเป็นต้องมีการตรวจวัดพารามิเตอร์อื่นๆ มากขึ้น และควรมีกระบวนการอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การกรอง การดูดซับแบบคอลัมน์ เป็นต้น

2. สามารถทำนายความเหมาะสมในการกำจัดไอออนลบ เช่นเดียวกับการกำจัดฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับจากตะกอนว่าเหมาะสมหรือไม่โดยพิจารณาจาก

2.1 พีเอชของน้ำ โดยจากการทดลองพบว่าสารละลายมีค่าพีเอชประมาณ 6.5 ซึ่งพีเอชที่มีความเป็นกรดเล็กน้อยความสามารถในการดูดซับไอออนลบของตะกอนจะดูดซับได้ดี แต่เมื่อสารละลายที่พีเอชของน้ำมีความเป็นด่าง ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับได้

2.2 ไอออนอื่นๆ ในน้ำ มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทได้แตกต่างกัน ควรคำนึงถึงลำดับในการกำจัดไอออน เพื่อให้การกำจัดไอออนแต่ละไอออนเกิดประสิทธิภาพสูงสุด หรือคำนึงถึงปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้จริงเมื่อมีการรบกวนจากไอออนต่างๆ ในน้ำ

3. สามารถนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อเพื่อนำตะกอนไปใช้ดูดซับมลสารอื่นๆ สำหรับใช้ในระบบการผลิตน้ำประปา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อโรงงานผลิตน้ำประปาเอง เพื่อเป็นการลดต้นทุนลดภาระค่ากำจัดตะกอน เป็นต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำตัวดูดซับไปใช้กำจัดฟลูออไรด์และไนเตรท ต้องการความสะดวกในการนำไปใช้งานให้มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษาต่อไปอาจศึกษาการดูดซับโดยลดขั้นตอนของการเตรียมตัวดูดซับ เช่น

งานวิจัยนี้ใช้ขนาดของตะกอนที่ใช้ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงระหว่างตะแกรงเบอร์ 12 และ ตะแกรงเบอร์ 8 ทำให้ได้ตะกอนระหว่างขนาด 1.68 ถึง 2.38 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดของตัวดูดซับส่งผล ต่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับ การศึกษาต่อไปอาจทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงเบอร์เดียว หรือหาวิธีการบด ตะกอนให้ได้ขนาดที่สม่ำเสมอและง่ายต่อการใช้งาน ลดขั้นตอนการล้างตะกอนลง เป็นต้น

2. ควรศึกษาการดูดซับต่อในระบบการดูดซับแบบคอลัมน์

3. ควรศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำจริงจากแหล่งอื่นๆ เพื่อศึกษา ประสิทธิภาพการดูดซับจริงและเก็บเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำไปพัฒนาตัวดูดซับให้กับงานวิจัยอื่นๆ ได้ต่อไป

4. ควรศึกษาด้านทุนการเตรียมตัวดูดซับเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนว่าคุ้มค่าต่อการนำไปใช้หรือไม่

รายการอ้างอิง

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

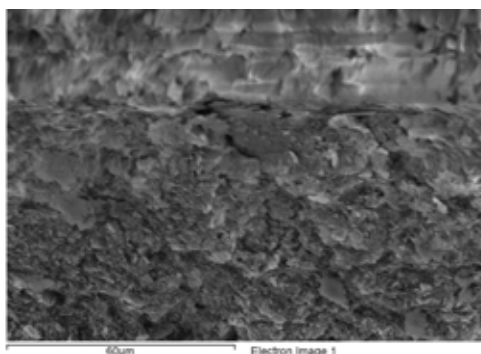
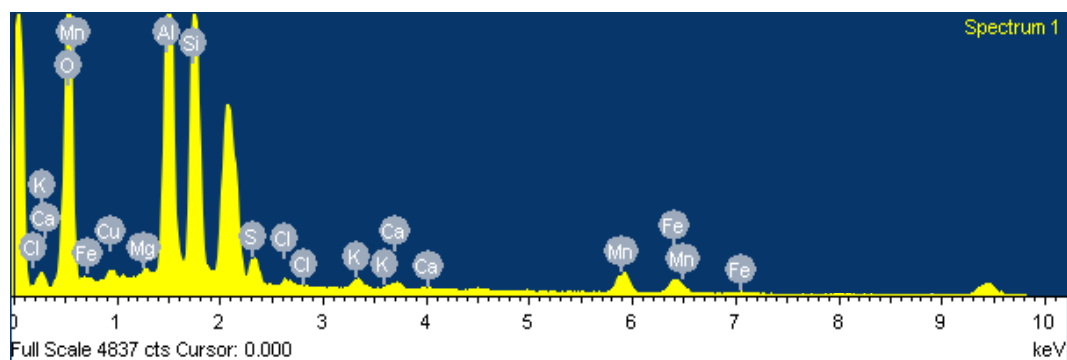
ภาคผนวก ก.1 การศึกษาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอน

ภาพที่ ก.1. 1 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ SN ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

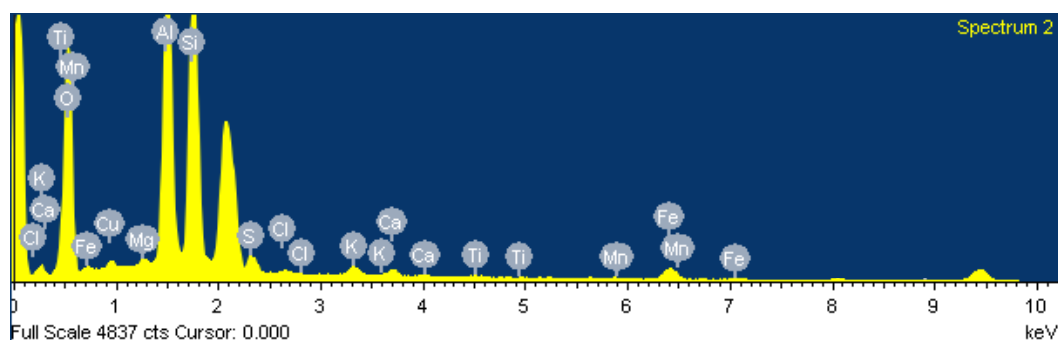
Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 4.500, 9.430 keV

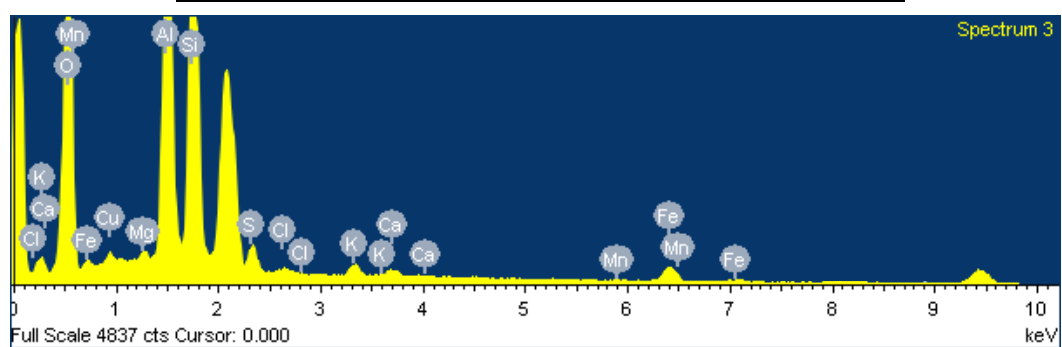
Processing option : All elements analyzed (Normalised)



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	34.50	1.2115	44.14	0.34	61.38
Mg K	0.22	0.8422	0.40	0.07	0.37
Al K	10.59	0.9248	17.73	0.17	14.62
Si K	10.21	0.8327	18.98	0.19	15.03
S K	1.39	0.8369	2.58	0.10	1.79
Cl K	0.30	0.7497	0.62	0.07	0.39
K K	0.63	1.0234	0.96	0.08	0.54
Ca K	0.47	0.9814	0.74	0.08	0.41
Mn K	3.54	0.8179	6.69	0.20	2.71
Fe K	2.83	0.8323	5.27	0.22	2.10
Totals			100.00		



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	28.32	1.1350	44.99	0.39	61.03
Mg K	0.20	0.8792	0.42	0.08	0.37
Al K	9.69	0.9530	18.32	0.19	14.73
Si K	10.78	0.8412	23.08	0.23	17.84
S K	0.91	0.8177	2.01	0.10	1.36
Cl K	0.13	0.7374	0.32	0.08	0.20
K K	0.61	1.0101	1.10	0.09	0.61
Ca K	0.45	0.9680	0.83	0.09	0.45
Ti K	0.21	0.8212	0.45	0.10	0.21
Mn K	0.19	0.8091	0.43	0.15	0.17
Fe K	2.79	0.8235	6.10	0.24	2.37
Totals			100.00		



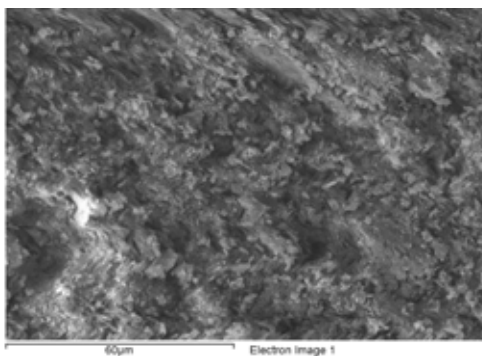
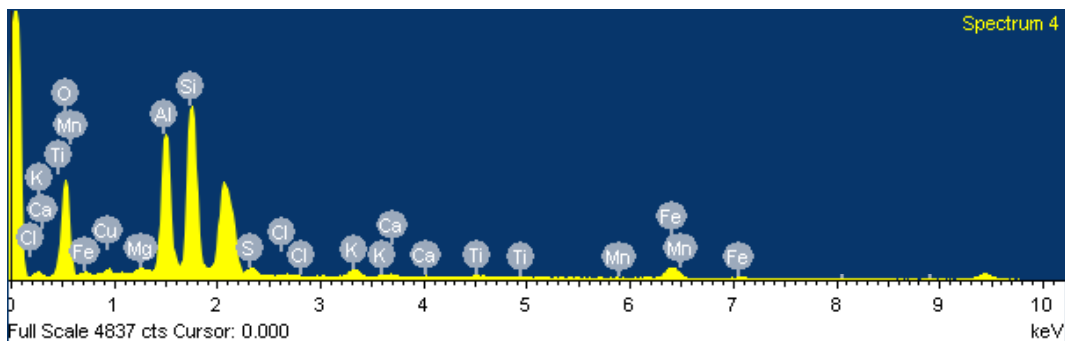
Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	47.82	1.2018	49.22	0.30	64.62
Mg K	0.25	0.8791	0.35	0.06	0.31
Al K	14.10	0.9522	18.30	0.15	14.25
Si K	14.45	0.8389	21.28	0.17	15.91
S K	1.33	0.8223	2.01	0.08	1.31
Cl K	0.18	0.7392	0.30	0.06	0.18
K K	0.83	1.0080	1.02	0.07	0.55
Ca K	0.56	0.9646	0.72	0.07	0.38
Mn K	0.25	0.8043	0.38	0.11	0.15
Fe K	3.30	0.8182	4.98	0.18	1.87
Totals			100.00		

ภาพที่ ก.1. 2 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ S500 ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

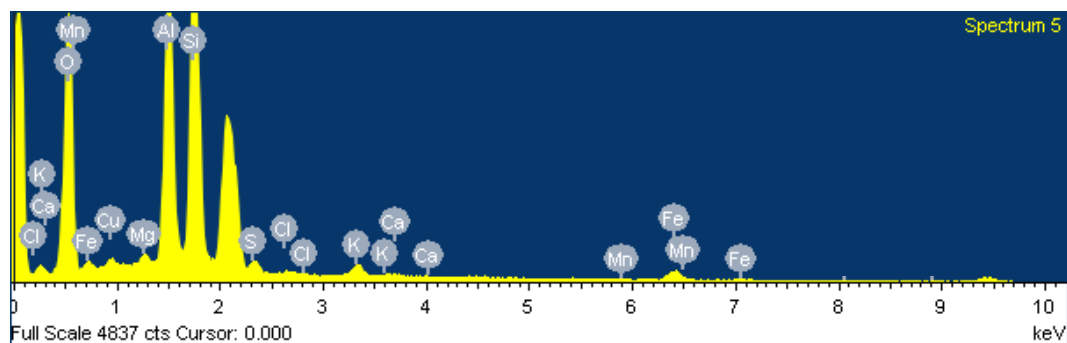
Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 9.432 keV

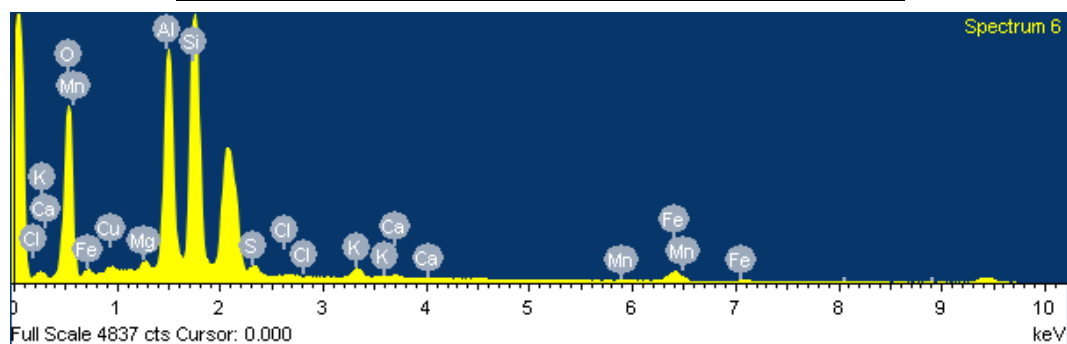
Processing option : All elements analyzed (Normalised)



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	11.71	1.0782	38.51	0.57	55.47
Mg K	0.13	0.8597	0.54	0.11	0.51
Al K	4.32	0.9388	16.29	0.26	13.92
Si K	6.36	0.8522	26.46	0.36	21.71
S K	0.36	0.8129	1.58	0.14	1.14
Cl K	0.01	0.7386	0.04	0.11	0.03
K K	0.54	1.0182	1.89	0.14	1.12
Ca K	0.17	0.9753	0.60	0.13	0.35
Ti K	0.18	0.8323	0.76	0.17	0.37
Mn K	0.04	0.8191	0.16	0.25	0.07
Fe K	2.60	0.8342	11.02	0.42	4.55
Totals			100.00		



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	31.70	1.1789	48.29	0.37	63.66
Mg K	0.32	0.8853	0.64	0.08	0.56
Al K	8.72	0.9543	16.38	0.18	12.81
Si K	11.77	0.8549	24.69	0.23	18.54
S K	0.65	0.8140	1.44	0.10	0.95
Cl K	0.07	0.7359	0.17	0.08	0.10
K K	0.86	1.0054	1.54	0.09	0.83
Ca K	0.19	0.9610	0.36	0.08	0.19
Mn K	0.06	0.8039	0.14	0.14	0.05
Fe K	2.07	0.8179	4.53	0.22	1.71
Totals			100.00		



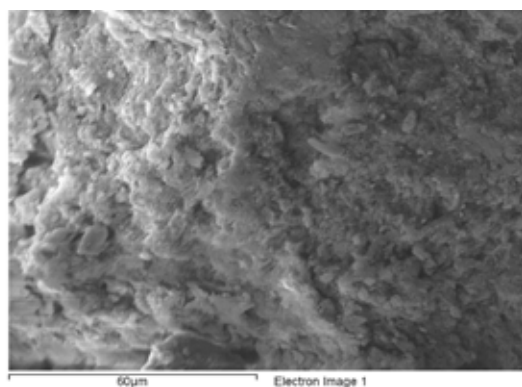
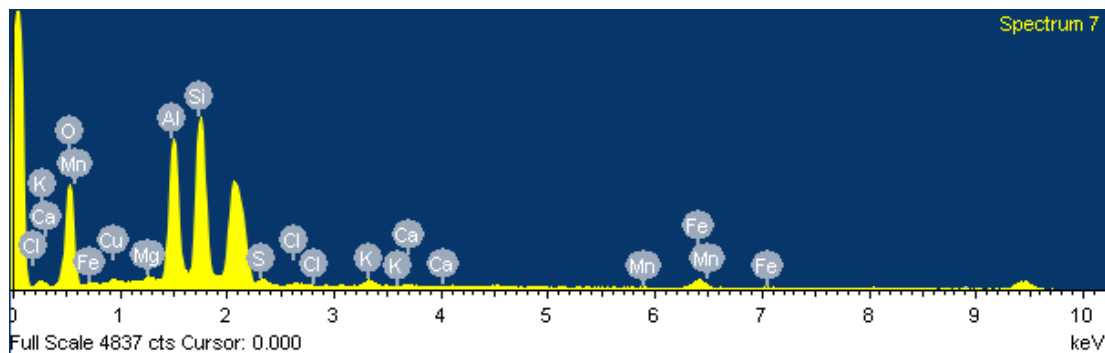
Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	20.88	1.1242	43.36	0.42	59.26
Mg K	0.32	0.8921	0.82	0.09	0.74
Al K	6.87	0.9591	16.69	0.20	13.53
Si K	9.88	0.8572	26.86	0.28	20.91
S K	0.53	0.8079	1.52	0.11	1.04
Cl K	0.07	0.7328	0.23	0.09	0.14
K K	0.69	1.0064	1.60	0.11	0.90
Ca K	0.19	0.9637	0.47	0.10	0.26
Mn K	0.13	0.8093	0.38	0.18	0.15
Fe K	2.29	0.8238	6.48	0.28	2.54
Totals			100.00		

ภาพที่ ก.1. 3 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ SA1 ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

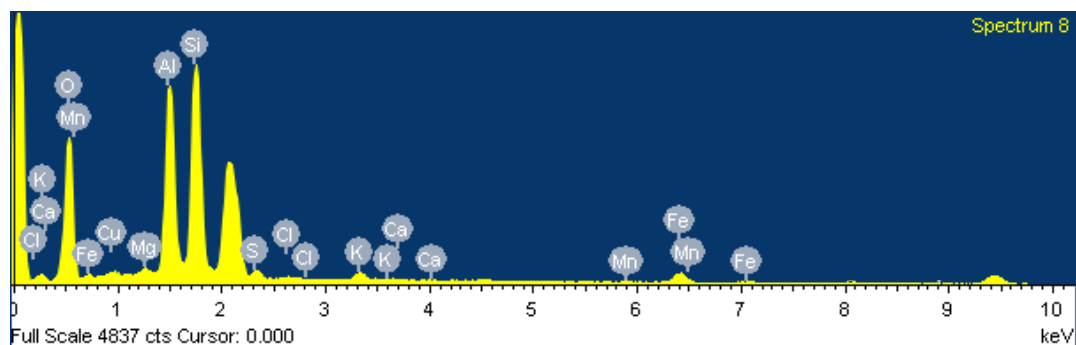
Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 4.501, 9.433 keV

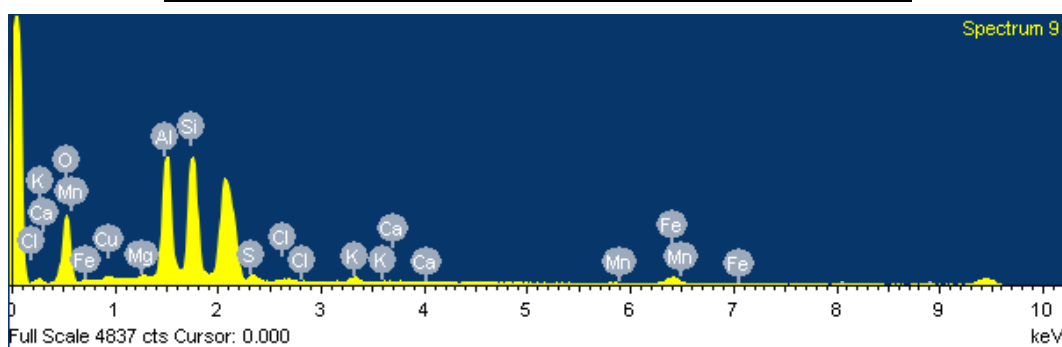
Processing option : All elements analyzed (Normalised)



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	11.82	1.1129	40.79	0.56	57.13
Mg K	0.12	0.8810	0.52	0.12	0.48
Al K	4.30	0.9548	17.29	0.27	14.36
Si K	5.98	0.8517	26.93	0.37	21.49
S K	0.26	0.8075	1.22	0.15	0.85
Cl K	0.09	0.7348	0.48	0.13	0.31
K K	0.39	1.0101	1.48	0.14	0.85
Ca K	0.15	0.9685	0.58	0.13	0.32
Mn K	0.03	0.8141	0.15	0.28	0.06
Fe K	1.90	0.8288	8.78	0.42	3.52
Totals			100.00		



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	17.25	1.1424	43.02	0.47	58.99
Mg K	0.18	0.8889	0.59	0.10	0.53
Al K	5.95	0.9594	17.65	0.23	14.35
Si K	7.91	0.8501	26.49	0.31	20.69
S K	0.37	0.8066	1.31	0.12	0.90
Cl K	0.04	0.7330	0.17	0.11	0.10
K K	0.47	1.0074	1.34	0.12	0.75
Ca K	0.11	0.9658	0.33	0.11	0.18
Mn K	0.10	0.8106	0.37	0.21	0.15
Fe K	2.08	0.8251	7.18	0.33	2.82
Totals			100.00		



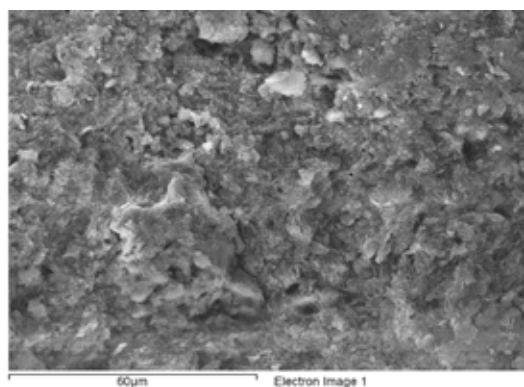
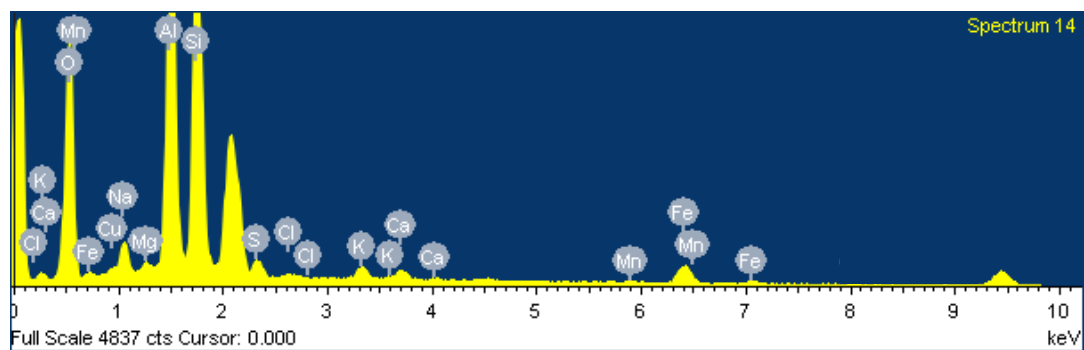
Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	8.01	1.0803	36.88	0.64	53.02
Mg K	0.09	0.8941	0.50	0.14	0.47
Al K	3.86	0.9658	19.83	0.34	16.90
Si K	4.66	0.8396	27.56	0.43	22.57
S K	0.26	0.8005	1.59	0.19	1.14
Cl K	0.04	0.7294	0.30	0.16	0.19
K K	0.36	1.0083	1.79	0.18	1.05
Ca K	0.02	0.9678	0.10	0.17	0.06
Mn K	0.05	0.8179	0.31	0.35	0.13
Fe K	1.46	0.8330	8.71	0.50	3.59
Totals			100.00		

ภาพที่ ก.1. 4 กราฟผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในตะกอนด้วยเครื่อง EDX ของตัวดูดซับ SB1 ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

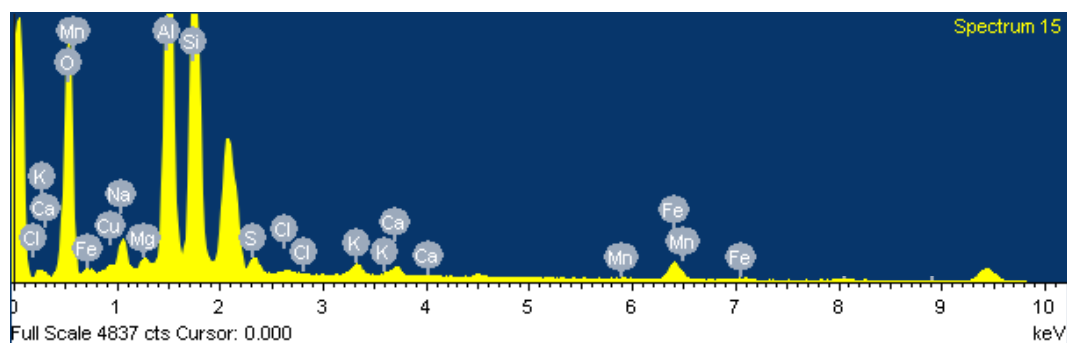
Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 4.520, 9.437 keV

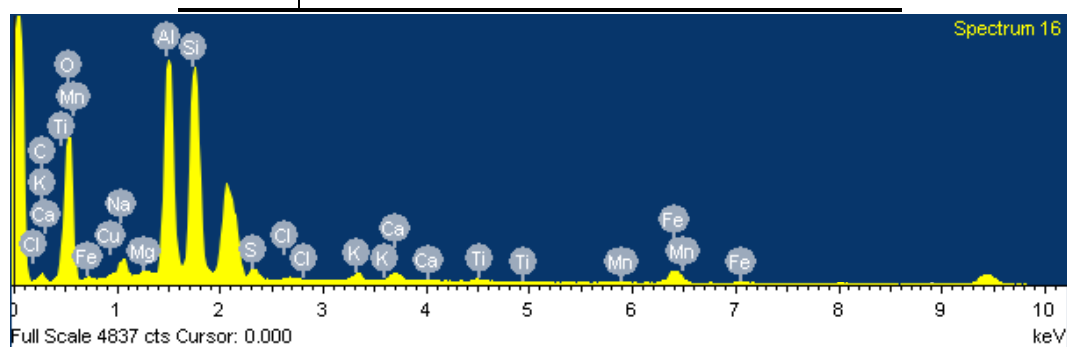
Processing option : All elements analyzed (Normalised)



Element	App Conc.	Intensity Corm.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	28.52	1.1080	39.70	0.34	55.60
Na K	1.57	1.0150	2.39	0.11	2.33
Mg K	0.23	0.8686	0.41	0.07	0.38
Al K	11.64	0.9455	18.97	0.17	15.75
Si K	13.08	0.8336	24.17	0.21	19.28
S K	0.88	0.8115	1.68	0.09	1.17
Cl K	0.17	0.7359	0.36	0.07	0.22
K K	0.81	1.0121	1.23	0.08	0.71
Ca K	0.71	0.9705	1.12	0.08	0.63
Mn K	0.29	0.8143	0.56	0.14	0.23
Fe K	4.23	0.8291	7.86	0.23	3.15
Totals			100.00		



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	28.83	1.1106	40.35	0.34	56.07
Na K	1.56	1.0247	2.37	0.11	2.29
Mg K	0.27	0.8756	0.48	0.07	0.44
Al K	11.68	0.9499	19.09	0.17	15.73
Si K	13.15	0.8345	24.47	0.21	19.37
S K	0.82	0.8097	1.56	0.09	1.08
Cl K	0.14	0.7347	0.30	0.07	0.19
K K	0.79	1.0104	1.21	0.08	0.69
Ca K	0.68	0.9687	1.09	0.08	0.60
Mn K	0.18	0.8126	0.34	0.14	0.14
Fe K	3.96	0.8273	7.43	0.22	2.96
Totals			100.00		



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	17.67	0.9591	38.48	1.30	48.30
Na K	0.91	1.0015	1.89	0.13	1.65
Mg K	0.14	0.8641	0.35	0.07	0.29
Al K	6.90	0.9392	15.33	0.52	11.41
Si K	7.90	0.8537	19.30	0.65	13.80
S K	0.55	0.8379	1.36	0.10	0.85
Cl K	0.08	0.7520	0.24	0.07	0.13
K K	0.52	1.0177	1.07	0.09	0.55
Ca K	0.64	0.9706	1.38	0.11	0.69
Ti K	0.22	0.8183	0.56	0.12	0.23
Mn K	0.16	0.8018	0.42	0.17	0.15
Fe K	2.82	0.8155	7.23	0.36	2.60
Totals			100.00		

**ภาคผนวก ก.2 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง
Surface area**

ตารางที่ ก.2. 1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน ของตัวดูดซับ SN

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน		
BET Multipoint Surface area	Surface area	62.132 m ² /g
	Slope	55.736
	Y-intercept	3.149e-01
	C constant	178.01
	Correlation Coefficient r	0.999768
BJH Adsorption summary	Surface area	62.067 m ² /g
	Pore Volume	0.213 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	13.730 A
BJH Desorption summary	Surface area	62.214 m ² /g
	Pore Volume	0.214 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	36.278 A

ตารางที่ ก.2. 2 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ S500

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน		
BET Multipoint Surface area	Surface area	39.9333 m ² /g
	Slope	87.091
	Y-intercept	1.188e-01
	C constant	733.822
	Correlation Coefficient r	0.999725
BJH Adsorption summary	Surface area	62.067 m ² /g
	Pore Volume	0.213 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	13.730 A
BJH Desorption summary	Surface area	62.214 m ² /g
	Pore Volume	0.214 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	36.278 A

ตารางที่ ก.2. 3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ SA1

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน		
BET Multipoint Surface area	Surface area	34.435 m ² /g
	Slope	106.966
	Y-intercept	4.026e-01
	C constant	266.700
	Correlation Coefficient r	0.999741
BJH Adsorption summary	Surface area	31.366 m ² /g
	Pore Volume	0.170 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	13.872 A
BJH Desorption summary	Surface area	42.049 m ² /g
	Pore Volume	0.174 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	36.285 A

ตารางที่ ก.2. 4 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ SB1

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน		
BET Multipoint Surface area	Surface area	67.813 m ² /g
	Slope	51.067
	Y-intercept	2.876e-01
	C constant	178.568
	Correlation Coefficient r	0.999813
BJH Adsorption summary	Surface area	67.836 m ² /g
	Pore Volume	0.203 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	13.681 A
BJH Desorption summary	Surface area	86.298 m ² /g
	Pore Volume	0.212 cc/g
	Pore Diameter Dv (d)	35.925 A

ภาคผนวก ข
การศึกษากระบวนการดูตลับ

ภาคผนวก ข.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์

ตารางที่ ข.1. 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SN, S300, S400, S500, S600 และ S700

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือ (มก./ล.)					
	SN	S300	S400	S500	S600	S700
1	10.0965	9.5136	9.7726	9.0511	11.1721	9.9676
2	9.8415	8.7879	8.7774	8.3552	9.5201	9.1630
5	9.4382	5.6240	7.2199	7.0621	8.2784	8.3830
10	8.6609	4.8124	5.1472	5.2431	7.2989	7.1893
15	8.1905	3.9635	4.2127	4.2065	6.7714	6.5357
30	7.1622	2.1869	3.9016	3.2617	5.3068	4.9421
45	6.1816	1.5659	2.9116	2.2579	4.1548	4.0176
60	5.7320	1.2106	2.3032	1.9658	3.7617	3.3813
90	4.7681	0.6496	1.9440	1.5402	3.0383	2.6686
120	4.1185	0.6584	1.8469	1.4502	2.5021	2.0744
240	3.0454	0.3556	1.8072	1.3995	2.1890	1.8621
360	2.7085	0.2060	1.7488	1.2619	2.0503	1.6968
720	2.6966	5.3731	1.6949	1.1053	1.9872	1.5182
1080	2.5925	8.2748	1.6321	1.0157	1.9003	1.4489
1440	8.9459	8.8671	1.5364	0.9871	1.8509	1.8760
ฟลูออไรด์ เริ่มต้น	10.3024	10.5147	12.0361	10.3260	12.4861	10.4424

หมายเหตุ : ใช้ตะกอน 5.0 กรัม สารละลายฟลูออไรด์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.1. 2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SA0.1, SA0.5, SA1, SB0.1, SB0.5 และ SB1

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของฟลูออไรด์ที่เหลือ (มก./ล.)					
	SA0.1	SA0.5	SA1	SB0.1	SB0.5	SB1
1	9.7762	9.9847	10.0017	10.1679	9.98107	10.0871
2	9.6271	9.3610	9.3978	9.7839	9.31757	9.9944
5	8.8205	8.5636	9.0148	9.96133	9.21637	9.15347
10	7.9348	7.4456	8.7134	9.38213	9.45753	9.87583
15	7.2348	6.8416	8.1122	9.45487	9.5342	9.73133
30	5.7951	5.0271	7.6300	9.93597	8.91527	9.38407
45	4.9022	3.9820	6.8812	9.30343	9.53147	9.26587
60	4.1003	3.0460	6.2062	9.89473	9.67973	9.50987
90	2.9554	2.6500	5.4200	10.1465	8.96923	8.7011
120	2.8521	1.5340	4.9251	9.20587	8.95587	9.98677
240	1.5798	1.3184	4.1772	10.1663	9.51513	9.36187
360	1.4259	1.1491	7.7300	9.5077	9.39703	9.5542
720	6.0863	7.6687	8.9181	9.59797	9.67153	9.78813
1080	6.0693	7.5832	12.5712	9.69053	9.5532	9.8172
1440	6.0405	7.5541	12.5571	9.5453	9.16323	8.99913
ฟลูออไรด์ เริ่มต้น	10.2091	10.4445	10.3562	10.2013	10.2013	10.2013

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ใช้ตะกอน 5.0 กรัม สารละลายฟลูออไรด์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.1. 3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SN, S300, S400, S500, S600, S700, SA0.1, SA0.5, SA1, SB0.1, SB0.5 และ SB1

เวลา (นาที)	ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH)											
	SN	S300	S400	S500	S600	S700	SA0.1	SA0.5	SA1	SB0.1	SB0.5	SB1
1	6.76	6.68	6.71	6.68	6.73	6.75	6.69	6.59	6.49	7.24	7.68	7.92
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.23	-	-
5	6.72	6.71	6.72	6.68	6.71	6.74	6.69	6.58	6.48	7.23	7.68	7.91
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	6.68	6.74	6.67	6.68	6.72	6.70	6.68	6.58	6.42	7.25	7.67	8.02
30	6.75	6.68	6.68	-	-	-	6.68	6.55	-	-	-	-
45	6.60	-	-	6.68	6.72	6.71	6.69	6.51	-	-	-	-
60	6.57	6.70	6.72	-	-	-	6.67	6.51	-	-	-	-
90	6.57	6.66	6.73	6.66	6.65	6.69	6.67	6.49	-	-	-	-
120	6.59	6.66	6.69	6.64	6.64	6.69	6.68	6.48	-	-	-	-
240	6.61	6.67	6.68	6.64	6.64	6.68	6.67	6.44	-	-	-	-
360	6.63	6.62	6.66	6.60	6.58	6.68	6.64	6.43	-	-	-	-
720	6.66	-	-	6.59	6.63	6.69	6.61	6.41	-	-	-	-
1080	-	6.65	6.69	6.65	6.66	6.68	6.59	6.40	-	-	-	-
1440	6.65	6.70	6.71	6.65	6.66	6.68	6.56	6.39	-	-	-	-

หมายเหตุ : ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ภาคผนวก ข.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรท

ตารางที่ ข.2. 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของไนเตรทที่เหลือ (มก./ล.)					
	SN	S400	S500	S600	SA0.1	SA0.5
1	50.6537	50.6803	49.8329	50.2133	49.1378	43.4997
2	49.8100	50.0110	48.1209	49.5008	48.7021	42.2596
5	48.1511	48.8737	46.7288	47.8268	47.0465	41.5675
10	47.1748	47.6901	44.2492	45.7141	45.1511	40.0392
15	46.3771	46.5761	42.2757	44.2303	43.6751	39.1969
30	45.0353	44.6096	40.8435	42.0429	41.0244	38.1269
45	44.3185	43.7510	38.9945	40.6264	39.2730	36.9207
60	43.4591	42.8287	38.5656	39.2242	38.7033	36.5601
90	42.9982	42.2729	38.4388	39.2299	38.7043	36.4986
120	42.4769	41.4241	38.4003	39.0784	38.6908	36.4836
240	45.4269	42.0990	38.1499	38.9936	40.5309	41.7972
360	48.0480	40.8089	38.0471	38.6747	44.7198	42.9769
720	50.3951	40.9591	37.8671	38.4617	45.7252	46.7960
1080	50.2077	40.5157	38.8057	38.0807	46.4301	46.8115
1440	50.0455	40.7320	39.0684	38.8004	46.8630	46.8296
ไนเตรท เริ่มต้น	51.2564	51.264	51.2710	51.2710	49.8809	50.0362

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ใช้ตะกอน 5.0 กรัม สารละลายไนเตรท ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.2. 2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5

เวลา (นาทื)	ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH)					
	SN	S400	S500	S600	SA0.1	SA0.5
1	6.77	6.76	6.71	6.71	6.68	6.61
2	6.76	-	-	-	-	-
5	-	6.75	6.68	6.72	6.65	6.60
10	6.76	6.73	-	-	-	-
15	6.75	6.75	6.68	6.70	6.65	6.60
30	6.74	6.73	-	-	-	6.59
45	6.74	-	6.65	6.68	6.63	6.57
60	6.75	6.72	6.66	6.65	6.61	6.55
90	6.71	6.70	6.65	6.64	6.60	6.51
120	6.69	6.69	6.65	6.64	6.58	6.48
240	6.68	6.65	6.63	6.65	6.57	6.43
360	6.68	6.65	6.64	6.63	6.55	6.41
720	6.67	6.67	6.64	6.65	6.54	6.40
1080	6.67	6.65	6.66	6.66	6.55	6.37
1440	6.67	6.66	6.65	6.65	6.55	6.32

หมายเหตุ : ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ภาคผนวก ข.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน

ตารางที่ ข.3. 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทโดยใช้ S500&A0.1 และ SA0.1&500

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของ ฟลูออไรด์ที่เหลือ (มก./ล.)				ความเข้มข้นเฉลี่ยของ ไนเตรทที่เหลือ (มก./ล.)			
	S500&A0.1	pH	SA0.1&500	pH	S500&A0.1	pH	SA0.1&500	pH
1	7.3134	6.74	8.6582	6.72	43.7434	6.71	37.3518	6.70
2	5.4910	-	6.8574	-	37.4081	-	35.6341	
5	3.4876	6.74	4.5833	6.72	30.7900	6.70	33.4641	6.70
10	2.8882	6.75	3.2980	6.72	29.6068	-	32.5198	-
15	2.3889	-	2.9113	-	28.3814	6.70	31.9046	6.71
30	2.1047	6.72	2.3734	6.70	27.2044	6.68	31.6550	-
45	1.5117	6.68	1.7886	-	25.8416	6.69	30.8916	6.69
60	1.0361	6.67	1.3773	6.65	25.3872	6.69	30.8363	-
90	0.7288	6.65	1.0156	6.64	24.6676	6.68	30.4586	6.66
120	0.4635	6.62	0.6223	6.60	24.0340	6.68	30.2152	6.65
240	0.1431	6.59	0.3946	6.59	23.7208	6.66	29.4783	6.62
360	0.1031	6.60	0.4593	6.58	22.5022	6.66	29.0318	6.59
720	0.1736	6.59	0.6342	6.59	22.0527	6.65	28.0162	6.57
1080	0.1784	6.58	0.6350	6.57	21.9045	6.66	27.3720	6.56
1440	0.2310	6.55	0.6433	6.57	20.2187	6.64	27.2128	6.57
C ₀ (มก./ล.)	10.3562		10.3058		50.2441		49.9439	

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตะกอน 5.0 กรัม สารละลายฟลูออไรด์และไนเตรท ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

ตารางที่ ข.4. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SN, S300 และ S400

SN				C ₀ (มก./ล.)	S300			S400		
ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH		ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH
5.0110	1.0373	0.4287	6.65	1.2691	5.0233	1.0254	6.66	5.010	0.2358	6.66
5.0227	2.2352	0.6642	6.65	2.2323	5.0130	1.1793	6.65	5.022	0.4691	6.65
5.0186	4.4767	0.4405	6.65	4.4692	5.0089	3.0216	6.64	5.010	0.9596	6.66
5.0137	5.7328	0.9848	6.64	6.8841	5.0223	3.5590	6.65	5.015	1.6274	6.64
5.0277	7.7001	1.5324	6.64	8.7032	5.0088	0.8052	6.64	5.004	1.8909	6.64
5.0337	10.0423	1.8965	6.63	11.5465	5.0287	0.3661	6.63	5.009	1.8049	6.62
5.0153	20.9602	4.1054	6.63	22.6503	5.0290	0.8078	6.63	5.006	3.7303	6.63
5.0110	30.4323	7.4542	6.64	32.1852	5.0213	1.2737	6.62	5.005	5.3315	6.63
5.0180	39.1833	10.0445	6.63	41.1417	5.0317	2.0328	6.62	5.010	6.4952	6.62
5.0243	49.2429	14.2037	6.63	50.3851	5.0193	2.6357	6.61	5.024	8.4565	6.62
5.0243	61.6451	17.3821	6.62	60.0063	5.0230	5.3595	6.62	5.013	10.5911	6.63
5.0150	81.5817	24.0633	6.61	76.5739	5.0320	8.8865	6.62	5.004	14.5533	6.63

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายฟลูออไรด์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.4. 2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ S500, S600 และ S700

C ₀ (มก./ล.)	S500			S600			S700		
	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH
1.2691	5.0200	0.2019	6.65	5.0407	0.2611	6.65	5.010	0.3011	6.66
2.2023	5.0080	0.3571	6.65	5.0084	0.4273	6.66	5.014	0.5567	6.67
4.3692	5.0112	0.6846	6.64	5.0091	0.7011	6.65	5.012	0.7159	6.67
6.6841	5.0083	1.1481	6.65	5.0213	1.4087	6.64	5.011	2.0006	6.65
8.7032	5.0094	1.5596	6.64	5.0122	2.0637	6.64	5.011	1.8885	6.65
11.5465	5.0253	1.5979	6.64	5.0167	2.3085	6.63	5.015	2.4935	6.66
22.6503	5.0100	3.1388	6.63	5.0260	4.3680	6.63	5.022	5.0131	6.66
32.1852	5.0103	4.4743	6.63	5.0087	6.6184	6.64	5.007	7.2831	6.64
41.1417	5.0060	5.6619	6.61	5.0193	8.5174	6.64	5.013	9.5793	6.65
50.3851	5.0080	7.5192	6.62	5.0200	9.8149	6.63	5.012	12.3520	6.65
60.0063	5.0063	8.8371	6.63	5.0120	12.1658	6.63	5.014	14.7218	6.64
76.5739	5.0057	12.2066	6.63	5.0157	16.6938	6.62	5.004	19.7550	6.64

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ชั่วโมง ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายฟลูออไรด์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.4. 3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ SA0.1 และ SA0.5

C ₀ (มก./ล.)	SA0.1			SA0.5			SA1		
	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	pH
1.0928	5.0433	0.1469	6.64	5.0272	0.1033	6.49	5.0178	1.0850	6.38
2.1727	5.0381	0.3097	6.65	5.0107	0.2499	6.50	5.0240	2.1640	6.38
4.3189	5.0333	0.5578	6.66	5.0126	0.5087	6.49	5.0161	4.3100	6.38
6.1425	5.0429	0.7188	6.65	5.0194	0.6354	6.48	5.0190	6.1200	6.39
8.5782	5.0437	1.0886	6.64	5.0169	1.2063	6.49	5.0169	7.3147	6.38
11.5465	5.0269	1.5087	6.64	5.0156	1.2624	6.47	5.0257	7.8667	6.37
22.6503	5.0203	3.8277	6.62	5.0265	3.0788	6.47	5.0263	12.4975	6.37
32.1852	5.0176	5.9058	6.62	5.0295	4.0841	6.46	5.0307	16.1477	6.36
41.1417	5.0144	9.7934	6.63	5.0248	6.9164	6.46	5.0168	19.7665	6.36
50.3851	5.0122	11.7569	6.62	5.0169	8.6295	6.48	5.0264	23.3890	6.35
60.0063	5.0220	16.9401	6.62	5.0414	11.7099	6.46	5.0349	26.7781	6.35
76.5739	5.0470	25.9276	6.63	5.0219	19.1218	6.46	5.0195	32.2945	6.35

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายฟลูออไรด์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท

ตารางที่ ข.5. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500 และ S600

C ₀ (มก./ล.)	SN		S400		S500		S600	
	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)
1.9500	5.0169	1.9234	5.0169	1.9534	5.0265	1.8636	5.0376	1.2482
4.0107	5.0129	4.0048	5.0129	4.0084	5.0669	4.0013	5.0329	4.0033
6.0275	5.0182	6.0217	5.0182	6.0187	5.0139	6.0113	5.0027	6.0108
8.1034	5.0192	8.0712	5.0192	8.0613	5.0309	8.0084	5.0086	8.0083
10.0328	5.0092	10.0227	5.0092	10.0273	5.0728	9.8698	5.0144	10.0132
20.1398	5.0160	16.0283	5.0160	16.9616	5.0483	14.3879	5.0307	15.1550
30.5393	5.0199	24.3924	5.0199	25.5643	5.0268	21.7265	5.0302	22.9424
40.6441	5.0251	33.0769	5.0251	34.4436	5.0449	29.5557	5.0109	31.2164
50.3875	5.0176	40.8293	5.0176	40.4094	5.0189	36.9936	5.0134	38.4109
60.6380	5.0134	48.9505	5.0134	46.2171	5.0473	44.5710	5.0327	46.7996
80.2687	5.0241	66.6733	5.0241	60.6759	5.0531	57.8846	5.0051	62.1853
101.5079	5.0077	80.1351	5.0077	77.0031	5.0367	70.8534	5.0116	73.0853

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายไนเตรทปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.5. 2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ SA0.1 และ SA0.5

C ₀ (มก./ล.)	SA0.1		SA0.5	
	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)	ตัวดูดซับ (กรัม)	C _e (มก./ล.)
2.3173	5.0119	2.2475	5.0280	1.9131
4.0107	5.0402	3.9812	5.0078	4.0101
6.9234	5.0157	6.8823	5.0175	6.0366
8.8079	5.0071	8.7019	5.0064	7.9835
10.3491	5.0215	10.1153	5.0093	9.5747
20.7578	5.0024	15.6887	5.0069	14.5029
30.6996	5.0137	23.6328	5.0380	21.6298
40.5872	5.0175	31.0464	5.0222	28.3585
50.7085	5.0154	39.2793	5.0292	35.6958
60.7073	5.0204	46.9661	5.0225	43.1345
81.1525	5.0303	61.5392	5.0201	59.6260
102.3676	5.0116	76.3500	5.0298	69.5618

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายไนเตรทปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.5. 3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ SN, S400, S500, S600, SA0.1 และ SA0.5

C ₀ (มก./ล.)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลาย					
	SN	S400	S500	S600	SA0.1	SA0.5
2	6.70	6.68	6.67	6.66	6.62	6.55
4	6.71	6.66	6.67	6.65	6.62	6.56
6	6.70	6.67	6.66	6.65	6.63	6.54
8	6.70	6.67	6.66	6.66	6.62	6.54
10	6.68	6.66	6.65	6.64	6.61	6.52
20	6.69	6.67	6.65	6.64	6.60	6.52
30	6.68	6.66	6.64	6.63	6.60	6.50
40	6.68	6.66	6.65	6.64	6.61	6.50
50	6.68	6.65	6.64	6.64	6.61	6.49
60	6.66	6.65	6.63	6.62	6.60	6.48
80	6.67	6.64	6.63	6.62	6.59	6.47
100	6.66	6.65	6.64	6.63	6.58	6.47

ภาคผนวก ข.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทด้วยตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีร่วมกัน

ตารางที่ ข.6. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ S500&A0.1 และ SA0.1&500

S500&A0.1				SA0.1&500			
ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH
5.0000	1.1303	0.1493	6.67	5.0302	1.0000	0.1514	6.66
5.0173	2.1812	0.2880	6.66	5.0154	2.1812	0.3300	6.65
5.0399	4.3252	0.6065	6.66	5.0154	4.3252	0.6440	6.66
5.0134	6.3609	0.6807	6.65	5.0225	6.3609	0.8419	6.65
5.0077	8.4665	1.0515	6.65	5.0071	8.4665	1.3505	6.65
5.0475	10.4832	1.3793	6.64	5.0129	10.4832	1.5782	6.64
5.0139	20.1311	2.1643	6.64	5.0139	20.1311	2.9377	6.63
5.0163	29.5011	3.6611	6.63	5.0093	29.1491	4.3277	6.63
5.0280	37.1833	4.3489	6.63	5.0134	37.8367	5.4696	6.64
5.0095	45.2429	5.2961	6.64	5.0078	45.9108	7.2959	6.64
5.0305	52.6451	6.0290	6.62	5.0135	52.3132	8.2724	6.63
5.0308	79.5817	8.1311	6.63	5.0064	78.5811	11.7855	6.63

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายฟลูออไรด์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.6. 2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทโดยใช้ S500&A0.1 และ SA0.1&500

S500&A0.1				SA0.1&500			
ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH
5.0100	1.9309	2.1087	6.68	5.0073	2.0100	2.2531	6.67
5.0051	4.0828	3.8922	6.67	5.0086	4.0415	3.9419	6.67
5.0074	6.1130	5.6197	6.67	5.0027	5.9865	5.7996	6.66
5.0087	8.1327	6.9409	6.66	5.0050	8.1475	7.6880	6.65
5.0102	10.3524	5.4161	6.66	5.0070	10.2483	7.0724	6.66
5.0093	20.4725	11.1665	6.65	5.0088	20.4381	14.2676	6.65
5.0187	30.8137	16.4551	6.66	5.0066	30.5941	22.0109	6.65
5.0096	40.3033	22.1256	6.64	5.0095	40.7329	29.4611	6.64
5.0110	50.1500	25.0528	6.65	5.0069	50.6191	33.5626	6.65
5.0110	60.9423	31.4156	6.65	5.0090	60.8767	43.8997	6.64
5.0068	80.8605	43.4310	6.64	5.0113	81.2671	53.8179	6.64
5.0088	101.0340	55.2856	6.64	5.0075	101.7663	66.5821	6.65

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย และสารละลายไนเตรทปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข.7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม

ตารางที่ ข.7. 1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทในน้ำมลสารรวม

ฟลูออไรด์				ไนเตรท			
ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH	ตัวดูดซับ (กรัม)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	pH
5.0048	1.4034	0.1352	6.66	5.0048	1.0422	1.3596	6.68
5.0067	2.6618	0.2778	6.67	5.0067	2.0433	2.3961	6.66
5.0043	4.2205	0.4564	6.67	5.0043	4.0551	4.0123	6.66
5.0086	6.7164	0.7119	6.66	5.0086	6.1215	5.9972	6.67
5.0055	8.1668	1.0062	6.65	5.0055	8.2686	7.7243	6.66
5.0085	10.3824	1.1932	6.65	5.0085	10.1228	9.4965	6.65
5.0080	23.7884	2.2625	6.64	5.0080	20.3670	19.2317	6.65
5.0087	34.4865	4.7561	6.64	5.0087	30.6702	15.3458	6.64
5.0081	44.5015	8.3927	6.63	5.0081	40.9170	21.9430	6.65
5.0084	53.9281	10.0192	6.64	5.0084	50.9273	28.2371	6.63
5.0103	62.7087	14.5071	6.63	5.0103	60.7555	35.7443	6.64
5.0083	80.3701	20.5034	6.63	5.0083	80.8887	51.8937	6.63
5.0106	97.6120	30.9863	6.62	5.0106	101.5131	68.9253	6.64

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย สารละลายฟลูออไรด์และไนเตรทปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข.8 การศึกษาผลของไอออนอื่นๆ ในน้ำต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรท

ตารางที่ ข.8. 1 ผลของคาร์บอเนต ไฮโดรเจนคาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟตไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทของตัวดูดซับ S500&A0.1

ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือ (มก./ล.)				ความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือ (มก./ล.)			
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0	1.4023	1.4023	1.4023	1.4023	25.1102	25.1102	25.1102	25.1102
50	2.0445	1.8923	1.3994	1.8871	27.8032	27.0111	26.7880	25.8903
100	2.8243	2.1437	1.4104	2.0103	31.4558	29.6643	27.1202	26.4652
200	4.0875	2.3783	1.3897	2.1985	34.0388	30.2304	27.8993	27.0023
300	4.8081	2.5018	1.4008	2.3094	35.8565	32.2235	28.7475	27.8904
400	5.2112	2.6855	1.3917	2.4941	37.2143	34.802	29.6102	28.8665
500	5.6104	2.9314	1.4084	2.6016	40.0032	35.3421	29.9334	30.0432

หมายเหตุ : ฟลูออไรด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรทเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มล.

ตารางที่ ข.8. 2 ผลของโซเดียมและแคลเซียมไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์และไนเตรทของตัวดูดซับ S500&A0.1

ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือ (มก./ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือ (มก./ล.)	
	Na ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
0	1.4023	1.4023	25.1102	25.1102
50	1.4102	1.3989	25.2103	25.201
100	1.3956	1.3882	25.8219	25.0438
200	1.4074	1.4038	25.4143	25.2091
300	1.3838	1.4206	24.9083	25.5227
400	1.4097	1.4109	25.3002	24.989
500	1.3988	1.3955	24.9905	25.3048
600	1.3911	1.4284	25.2023	26.1021
700	1.4023	1.4023	25.1102	25.1102

หมายเหตุ : ฟลูออไรด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรทเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มล.

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างภาพการทดลอง



ภาพที่ ค. 1 ตะกอนอบแห้ง 103 ± 2 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ค. 2 ตัวอย่างตะกอนเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ค. 3 ตัวอย่างตะกอนเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป



ภาพที่ ค. 4 ล้างตะกอนด้วย DI water และนำไปอบให้แห้ง



ภาพที่ ค. 5 ตะกอนกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก



ภาพที่ ค. 6 ขวดเก็บตัวอย่าง (Conical bottom plastic vial)



ภาพที่ ค. 7 ตู้อบตู้อบความร้อน (Oven)



ภาพที่ ค. 8 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Ashing Furnace)



ภาพที่ ค. 9 เครื่อง Ion Chromatography

ภาคผนวก ง
ตารางมาตรฐานคุณภาพน้ำ

ตารางที่ ง. 1 แสดงมาตรฐานอุตสาหกรรมน้ำบริโภค

มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค				
คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด ^a
ทางกายภาพ	สี (Colour)	แพลทินัม โคบอลต์	5	15
	รส (Taste)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	กลิ่น (Odour)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	ความขุ่น (Turbidity)	ความขุ่น	5	20
	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5 - 8.5	9.2
ทางเคมี	ปริมาณสารทั้งหมด (Total Solids)	มก./ล.	500	1,500
	เหล็ก (Fe)	มก./ล.	0.5	1.0
	แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	0.3	0.5
	เหล็กและแมงกานีส (Fe&Mn)	มก./ล.	0.5	1.0
	ทองแดง (Cu)	มก./ล.	1.0	1.5
	สังกะสี (Zn)	มก./ล.	5.0	15.0
	แคลเซียม (Ca)	มก./ล.	75 ^b	200
	แมกนีเซียม (Mg)	มก./ล.	50	150
	ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	มก./ล.	200	250 ^c
	คลอไรด์ (Cl)	มก./ล.	250	600
	ฟลูออไรด์ (F)	มก./ล.	0.7	1.0
	ไนเตรท (NO ₃ ⁻)	มก./ล.	ไม่เกิน 45	45
	อัลคิลเบนซิลซัลโฟเนต (Alkylbenzyl Sulfonate, ABS)	มก./ล.	0.5	1.0
	ฟีนอลิกซัสแตนซ์ (Phenolic substances as phenol)	มก./ล.	0.001	0.002

ตารางที่ ง. 1 (ต่อ) แสดงมาตรฐานอุตสาหกรรมน้ำบริโภค

มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค				
คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด ^a
สารพิษ	สารหนู (As)	มก./ล.	0.05	-
	ไซยาไนด์ (CN)	มก./ล.	0.2	-
	ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	0.05	-
	ปรอท (Hg)	มก./ล.	0.001	-
	แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	0.01	-
	ซีลีเนียม (Se)	มก./ล.	0.01	-
	โครเมียม (Cr ⁶⁺)	มก./ล.	0.05	-
	แบเรียม (Ba)	มก./ล.	1.0	-
ทางจุลชีววิทยา	แสดนดาร์ตเพลตเคานต์ (Standard plate count)	โคโลนีต่อ ลบ.ซม.	500	-
	เอ็มพีเอ็น (MPN)	โคลิฟอร์ม ออร์แกนีสซึม ต่อ 100 ลบ.ซม.	น้อยกว่า 2.2	-
	อี. โคไล (E.coli)	-	ไม่มี	-

หมายเหตุ : a เกณฑ์อนุโลมให้สูงสุดเป็นเกณฑ์ที่อนุญาตให้สำหรับน้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่มีความจำเป็นต้องใช้บริโภคเป็นการชั่วคราวและน้ำที่มีคุณลักษณะอยู่ในระหว่างเกณฑ์กำหนดสูงสุด กับเกณฑ์อนุโลมสูงสุดนั้นไม่ใช่หน้าที่ให้เครื่องหมายมาตรฐานได้

b หากแคลเซียมมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนด และแมกนีเซียม มีปริมาณต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐานให้พิจารณาแคลเซียมและแมกนีเซียมในเทอมของความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) ถ้ารวมความกระด้างทั้งหมดเมื่อคำนวณเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต มีปริมาณต่ำกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ถือว่าน้ำนั้นเป็นไปตามมาตรฐานการแบ่งระดับความกระด้างของน้ำดังต่อไปนี้

0 - 75	มิลลิกรัมต่อลิตร	เรียกว่า น้ำอ่อน
75 - 150	มิลลิกรัมต่อลิตร	เรียกว่า น้ำกระด้างปานกลาง
150 - 300	มิลลิกรัมต่อลิตร	เรียกว่า น้ำกระด้าง
300	มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป	เรียกว่า น้ำกระด้างมาก

c หากซัลเฟต มีปริมาณถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียม ต้องมีปริมาณไม่เกิน 30

มิลลิกรัมต่อลิตร (มิลลิกรัมต่อลิตร = มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมอนามัย. 2543. คู่มือผู้ดูแลระบบประปาหมู่บ้านผิวดินและผิวดินขนาดใหญ่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์ (ร.ส.พ.).
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิตรกร วงศ์กรเชาวลิต. 2543. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปาและการนำไปใช้งานเป็นวัสดุปอซโซแลนในงานคอนกรีต. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ชัยพร เบ้าแก้ว. 2547. การนำตะกอนที่ได้จากระบบประปามาทำเป็นอิฐสามัญ. รายงานโครงการหมายเลข CE 2003-24 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ฐิติพงศ์ เอี่ยมวรารักษ์. 2544. การพัฒนาและการเปรียบเทียบวิธีทดสอบเพื่อหาปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำสำหรับใช้ในภาคสนาม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสกร วิชิตอมรพันธ์ และ วรธนะ เรืองสำเร็จ. 2547. การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา ฉบับที่ สอพ. 16/2547. กรุงเทพมหานคร : สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล. 2554. วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนพร คำขจร. 2552. การกำจัดสีขุ่นและสารลดแรงตึงผิวด้วยเศษแก้วเคลือบแมงกานีสออกไซด์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธวัชชัย สิงหศิริ. 2548. การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาเพื่อการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปรีศนา เสือแซมเสริม. 2545. สมบัติบางประการของตะกอนแยกจากน้ำดิบของการประปานครหลวง (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันตุลเวศน์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รุจิรา ไทยเอียด. 2548. ศึกษาและออกแบบระบบบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินแบบทีละเทโดยวิธีการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท้อป.

สุรศักดิ์ มานะรัตน์สุวรรณ. 2541. การกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและจากแหล่งน้ำธรรมชาติ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อนันต์ ตั้งเสถียรกิจ และ วารีย์ ตาทอง. 2545. ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำด้วยวิธีการดูดซับด้วยดิน. (ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต), สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอิบ เขียววรีนรมย์. 2542. การสำรวจดิน : มโนทัศน์ หลักการและเทคนิค. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาษาอังกฤษ

Abe, I., and Iwasaki, S. 2003. Adsorption of fluoride ions onto carbonaceous materials. Journal of Colloid and Interface Science. [Online], Available: <http://www.science.com> [2018, August 9].

Abo-El-Enein, S. A., Shebl, A., and Abo El-Dahab, S. A. 2017. Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal. Applied Clay Science 146: 343-349.

Albadarin, A. B., Mangwandi, C., Al-Muhtaseb, A. H., Walker, G. M., Allen, S. J., and Ahmad, M. N. M. 2012. Kinetic and thermodynamics of chromium ions adsorption onto low-cost dolomite adsorbent. Chemical Engineering Journal 179: 193-202.

Anna Selby, 2002, The Case Against Fluoride [Online], Available : <http://www.purewatergazette.net/caseagainstfluoride.htm> [2018, July 4].

Babu, A. N., Reddy, D. S., Kumar, G. S., Ravindhranath, K., and Mohan, G. K. 2018. Removal of lead and fluoride from contaminated water using exhausted coffee grounds based bio-sorbent. Journal of environmental management 218: 602-612.

Bansiwal, A., Pillewan, P., Biniwale, R. B., and Rayalu, S. S. 2010. Copper oxide incorporated mesoporous alumina for defluoridation of drinking water, Microporous and Mesoporous Materials 129: 54-61.

Bekele, W., Faye, G., and Fernandez, N. 2014. Removal of nitrate ion from aqueous solution by modified Ethiopian bentonite clay. International Journal of Research in Pharmacy and Chemistry 4(1): 192-201.

Beman, J. M., Arrigo, K. R., and Matson, P. A. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. Nature 434: 211-214.

- Benguella, B., and Yacouta-Nour, A., 2009. Adsorption of Bezanyl Red and Nylomine Green from aqueous solutions by natural and acid-activated bentonite. Desalination 235: 276-292.
- Bhatnagar, A., and Sillanpa, M. 2011. A review of emerging adsorbents for nitrate removal from water. Chemical Engineering Journal 168: 493-504.
- Bohn, H. L., Mcneal, B. L., and George, A. 1985. Soil Chemistry, 2nd, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A. 341.
- Bower, C. A., and Hatcher, J. T. 1967. Adsorption of fluoride by soils and minerals. Soil Science 103: 151-154.
- Canter, L. W. 1997. Nitrates in Groundwater. CRC press, Boca Raton.
- Cengeloglu, Y., Kir, E., and Ersoz, M. 2002. Removal of fluoride from aqueous solution by using red mud. Separation and Purification Technology 28: 81-86.
- Chen, N., Zhang, Z., Feng, C., Li, M., Chen, R., and Sugiura, N. 2011. Investigations on the batch and fixed-bed column performance of fluoride adsorption by kanuma mud. Desalination 268: 76-82.
- Chung, H. K., Kim, W. H., Park, J., Cho, J., Jeong, T. Y. 2015. Application of Langmuir and Freundlich isotherms to predict adsorbate removal efficiency or required amount of adsorbent. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 28: 241-246.
- Coetzee, P. P., Coetzee, L., L., and Mubenga, S. 2003. Characterisation of selected South African clays for defluoridation of natural waters. Water South Africa 36(3): 331-338.
- Cooney, O. D. 1999. Adsorption design for wastewater treatment Florida: CRC Press.
- Davidson, J. H., and McMurry, P. H., 2000. Adsorption [Online], Available : <http://www.me.umm.edu/course/me5115/notes/adsorption-1.pdf> [2018, July 8]

- Dehestanlathar, S., and Rezaee, A. 2014. Adsorption of nitrate from aqueous solution using activated carbon-supported Fe^0 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, and FeSO_4 . Journal of Advances in Environmental Health Research 2(3): 181-8.
- Fan, S., Wang, Y., Wang, Z., Tang, J., and Li, X. 2017. Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism. Journal of Environmental Chemical Engineering 5: 601-611.
- Fawell, J., Bailey, J., Chilton, J., Dahi, E., Fewtrell, L., and Magara, Y. 2006. Fluoride in drinking-water WHO Drinking-water Quality Series, IWA Publishing.
- Gebreworld, B. D., Kijjanapanich, P., Rene, E. R., Lens, P. N. L., and Annachhatre, A. P. 2018. Fluoride removal from groundwater using chemically modified rice husk and corn cob activated carbon. Environmental Technology, DOI: [10.1080/09593330.2018.1459871](https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1459871)
- Gregg, S. J., and Sing, K. S. W. 1982. Adsorption surface area and porosity, 2nd ed, Academic Press Inc., London 248-254.
- Gulnaz, O., Kaya, A., and Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. Journal of Hazardous Materials 134: 190-196.
- Gupta, R. S., Naik, S., and Singbal, S. Y. S. 1978. A study of fluoride, calcium and magnesium in the Northern Indian Ocean. Marine Chemistry 6: 25-141.
- Ho, Y.S., and McKay, G. 1998. Sorption of dye from aqueous solution by peat. Chemical Engineering Journal 70(2): 115-124.
- Kao, W. F., Deng, J. F., Ching, S. C., Heard, K., Yen, D. H. T., Lu, M. C., Kuo, B. I. T., Kuo, C. C., Liu, T. Y., and Lee, C. H. 2004. A simple, safe, and efficient way to treat severe fluoride poisoning-Oral calcium or magnesium. Clinical Toxicology 42(1): 33-40.
- Karthikeyan, G., Pius, A., and Alagumuthu, G. 2005. Fluoride adsorption studies of montmorillonite clay. Indian Journal of Chemical Technology 12: 263-272.

- Katal, R., Baei, M. S., Rahmati, H. T., & Esfandian, H. 2012. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18: 295-302.
- Kayranli, B. 2011. Adsorption of textile dyes onto iron based waterworks sludge from aqueous solution; isotherm, kinetic and thermodynamic study. Chemical Engineering journal 173: 782-791.
- Kul, A. R., and Koyunch, H. 2010. Adsorption of Pb(II) ions from aqueous solution by native and activated bentonite: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study. Journal of Hazardous Materials 179: 332-339.
- Lagergren, S. 1898. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar 24(4): 1-39.
- Loganathan, P., Vigneswaran, S., and Kandasamy, J. 2013. Enhanced removal of nitrate from water using surface modification of adsorbents – a review. Journal of Environmental Management 131: 363-374.
- Lung, S. C. C., Hsiao, P. K., and Chiang, K. M. 2003. Fluoride concentrations in three types of commercially packed tea drinks in Taiwan. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 13(1): 66-73.
- Lupo, M., Lombarte, M., Fina, B. L., and Rigalli, A. 2015. Development of a household method for treatment of highly fluoridated water using processed eggshell. Actualizaciones en Osteologia 11(3): 209-219.
- Madejova, J., and Komadel, P. 2001. Baseline Studies of the Clay Minerals Society Source Clays: Infrared Methods. Clays and Clay Minerals 49(5): 410-432.
- Mena-Duran, C. J., Sun Kou, M. R., Lopez, T., Azamar-Barrios, J. A., Aguilar, D. H., Dominguez, M. I., Odriozola, J. A., and Quintana, P. 2007. Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation. Applied Surface Science 253: 5762-5766.

- Mena-Duran, C. J., Sun-Kou, M. R., Lopez, T., Azamar-Barrios, J. A., Aguilar, D. H., Domínguez, M. I., Odriozola, J. A., and Quintana, P. 2007. Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation. Applied Surface Science 253: 5762-5766.
- Michael, J. S., and Donald, N. M. 1992. *Soils*, 2nd ed., Macmillan Publishing Company, New York 34-57.
- Moges, G., Zewge, F., and Socher, M., 1996. Preliminary investigation on the defluoridation of water using fired clay chips. Journal of African Sciences 21: 479-482.
- Nicolini, K. P., Fukamachi, C. R. B., Wypych, F., and Mangrich, A. S., 2009. Dehydrated halloysite intercalated mechanochemically with urea: Thermal behavior and structural aspects. Journal of Colloid and Interface Science 338(2): 474-479.
- Phupaibul, P., Chitbuntanorn, C., Chinoim, N., Kangyawongha, P., and Matoh, T. 2004. Phosphorus accumulation in soils and nitrate contamination in underground water under export-oriented asparagus farming in Nong Ngu Lauem village, Nakhon Pathom Province, Thailand. Soil Science and Plant Nutrition 50: 385-393.
- Raichur, A. M., and Basu, M. J. 2001. Adsorption of fluoride onto mixed rare earth oxide. Separation and Purification Technology 24: 121-127.
- Rajeswari, A., Amalraj, A., and Pius, A. 2016. Adsorption studies for the removal of nitrate using chitosan/PEG and chitosan/PVA polymer composites. *Journal of Water Process Engineering* 9: 123-134.
- Rocca, C. D., Belgiorno, V., and Meric, S. 2007. Overview of in-situ applicable nitrate removal process. Desalination 204: 46-62.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., and Zhang, L. 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. Water Resources Research 43-51.
- Shan, Y., and Guo, H. 2013. Fluoride adsorption on modified natural siderite: Optimization and performance. Chemical Engineering Journal 223: 183-191.

- Shivayogimath, C., Hiremath, M., and Lokeshappa. 2014. Batch adsorption of fluoride using low cost adsorbents prepared from corncob and Acacia nilotica stalk by KOH activation. Lokeshappa International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) 3(6).
- Söderlund, R., and Svensson, B. 1976. The Global Nitrogen Cycle. Ecological Bulletins, 22: 23-73.
- Srimurali, M., Pragathi, A., and Karthikeyan, J. 1998. A study on removal of fluorides from drinking water by adsorption onto low-cost materials. Environmental Pollution 99: 285-289.
- Sujana, M. G., Thakur, R. S., and Rao, S. B. 1998. Removal of fluoride from aqueous solution by using alum sludge. Journal of Colloid and Interface Science 206: 94-101.
- Susheela, A. K., Mudgal, A., and Keast, G. 1999. Fluoride in water: An overview. Waterfront 13: 12-13.
- Thuy, Q., 2006. Effect of acid/base treatment of powdered activated carbon on adsorption and membrane fouling in PAC-Microfiltration system (PAC-MF). Doctoral dissertation. Department of Engineering Graduate School The University of Tokyo.
- Tor, A., Danaoglu, N., Arslan, G., and Cengeloglu, Y. 2009. Removal of fluoride from water by using granular red mud: Batch and column studies. Journal of Hazardous Materials 164: 271-278.
- Townsend, A. R., Howarth, R. W., Bazzaz, F. A., Booth, M. S., Cleveland, C. C., Collinge, S. K., Dopson, A. P., Epstein, P. R., Holland, E. A., and Keeney, D. R. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. Frontiers in Ecology and the Environment 1: 240-246.
- Viets, F. G., and Hageman, H. 1971. Factors affecting the accumulation of nitrates in soil, water and plants. Agriculture Handbook No.413. Agricultural Research Service. U. S. Department of Agriculture.

- Vinati, A., Mahanty, B., and Behera, S. K. 2015. Clay and clay minerals for fluoride removal from water: A state-of-the-art review. Applied Clay Science 114: 340-348.
- Vinitnantharat, S., Kositchaiyong, S., and Chiarakorn, S. 2010. Removal of fluoride in aqueous solution by adsorption on acid activated water treatment sludge. Applied Surface Science 256: 5458-5462.
- Viswanathan, N., and Meenakshi, S. 2010. Enriched fluoride sorption using alumina/chitosan composite, Journal of Hazardous Materials 178: 226–232.
- Wang, Y., and Reardon, E. J. 2001. Activation and regeneration of soil sorbent for defluoridation of drinking water. Applied Geochemistry 16: 531-539.
- Ward, M. H., Dekok, T. M., and Levallois, T. M. 2005. Workgroup report: drinking-water nitrate and health-recent findings and research needs. Environmental Health Perspectives 113: 1607-1614.
- Wendt, R. C., and Corey, R. B. 1980. Phosphorus variations in surface runoff from agricultural lands as a function of land use. Journal of Environmental Quality 9: 130-136.
- Weyer, P. J., Cerhan, J. R., Kross, B. C., Hallberg, G. R., Kantamneni, J., Breuer, G., Jones M. P., Zheng, W., and Lynch, C. F. 2001. Municipal drinking water nitrate level and cancer risk in older women: the Iowa women's health study. Epidemiology 12: 327-338.
- Yadav, A. K., Kaushik, C. P., Haritash, A. K., Kansal, A., and Rani, N. 2006. Defluoridation of groundwater using brick powder as an adsorbent. Journal of Hazardous Materials 128: 289-293.
- Zhang, Y., Song, X. L., Huang, S. T., Geng, B. Y., Chang, C. H., and Sung, I. Y. 2013. Adsorption of nitrate ions onto activated carbon prepared from rice husk by NaOH activation. Desalination and Water Treatment 4935-4941.
- Zohouri, F. V., and Rugg-Gunn, A. J. 1999. Fluoride concentration in foods from Iran. International Journal of food sciences and nutrition 50: 265-274.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง
วัน เดือน ปีเกิด	8 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์ บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	149 ซอยวัดบรมนิวาส ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน แขวงรองเมือง กรุงเทพมหานคร 10330
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	เบญจพร ส่งสกุลรุ่งเรือง, ดวงสิทธิ์ เด่นเพชรกุล และ สุชา ชาวเอียร. 2561. การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยตะกอนน้ำประปาที่ผ่านการกระตุ้น ด้วยความร้อน. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 17, จังหวัดอุดรธานี, ประเทศไทย, 24-25 พฤษภาคม 2561, หน้า 137- 138.