

การพัฒนากระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อใช้ใน
การบำบัดสีในกระบวนการผลิตน้ำประปา

นางสาวลัทธิกา กองวิเชียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
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.

DEVELOPMENT OF HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE AND GAC ADSORPTION,
FOR COLOR REMOVAL IN TAP WATER TREATMENT PROCESS

Miss. Lucksiga Kongvichen

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนากระบวนการไฮบริดไฮโดรไฮโคลนและ
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อใช้ในการ
บำบัดสีในกระบวนการผลิตน้ำประปา

โดย

นางสาวลักขณา กองวิเชียร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินุชย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศรายุทธ ราชู)

ลัทธิกา กองวิเชียร: การพัฒนากระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วย
 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อใช้ในการบำบัดสีในกระบวนการผลิตน้ำประปา.
 (DEVELOPMENT OF HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE AND GAC
 ADSORPTION, FOR COLOR REMOVAL IN TAP WATER TREATMENT
 PROCESS.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 181 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริด
 ไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิก ซึ่งเป็น
 ตัวแทนของสีในน้ำดิบตามธรรมชาติ รวมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถใน
 การดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดโดยใช้
 ไฮโดรไซโคลน ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำเนินงานของระบบไฮบริดใน
 งานวิจัยนี้ คือ ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35
 เมช ในการดูดซับกรดฮิวมิก ที่ค่าพีเอชของสารละลาย 5-8 และใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 9 มิลลิเมตร ในการแยกถ่าน
 กัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากระบบที่ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน 1 บาร์ เมื่อนำสภาวะที่เลือก
 ดังกล่าวไปเดินระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบไหล
 ต่อเนื่อง (Continuous operating) พบว่า เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบในแง่ของการดูดซับ
 กรดฮิวมิก ระบบสามารถกำจัดความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ลดลงได้ โดยที่
 อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที ต้องการอัตราการไหลตัวกลางดูดซับมากกว่า 1.5
 กรัมต่อนาที ถึงจะบำบัดน้ำเสียให้ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเหลือน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้
 และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่ของการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้ว
 พบว่าไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดไม่สูงนัก เนื่องจากการแตก
 ของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ 6 ชั่วโมง ทำให้ขนาดของถ่าน
 กัมมันต์เล็กลง โดยประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์มีค่าประมาณร้อยละ 40-70 ดังนั้นจึงสรุป
 ในขั้นต้นได้ว่า ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดสามารถใช้
 ในการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำดิบได้จริง แต่ควรจะทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
 ในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไซโคลน

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา..... 2556ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5470348721: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: HYBRID PROCESS / HYDROCYCLONE/ ADSORPTION / HUMIC ACID / GRANULAR ACTIVATED CARBON

LUCKSIGA KONGVICHEN: DEVELOPMENT OF HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE AND GAC ADSORPTION, FOR COLOR REMOVAL IN TAP WATER TREATMENT PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 181 pp.

The objective of this work was to study a hybrid process consisted of adsorption and hydrocyclone for treating humic acid which represented color of natural raw water. This work also studied various parameters which affected the adsorption capacity and the separation performance of hydrocyclone. The results showed that the optimum operating condition for this hybrid process was a using of Filtrasorb 200 GACs with a particle size of 30x35 mesh at pH of 5-8 for humic acid removal. Moreover, in order to separate the applied GACs completely, a 50 mm diameter hydrocyclone with a 9 mm diameter apex was required for GACs separation at inlet pressure of 1 bar. Subsequently, the selected condition was further applied in the continuous operation. In term of adsorption, the result showed that the concentration of humic acid could be decreased by this system. At wastewater flow rate of 1 L/min, the system required adsorbent flow rate of more than 1.5 g/min to eliminate HA concentration of less than 5 mg/l. In term of separation, the results indicated that the separation efficiency using the hydrocyclone to separate GACs from treated water was approximately 40-70 %. The low efficiency was related to the reduction of adsorbent size along the operating time 6 hr. Hence, it could be concluded that the hybrid system could be possibly operated for removing humic acid from raw water in water supply. However, the further study on hydrocyclone separation should be considered in order to increase the the separation efficiency.

Department: Environmental Engineering..... Student's Signature.....
 Field of Study: Environmental Engineering..... Advisor's Signature.....
 Academic Year: 2013..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมผู้สละเวลาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการปฏิบัติ หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร. สรายุทธ ราชู ที่ได้ให้คำชี้แนะ และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการน้ำดี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ นาย ศุภบุศย์ ดำรงกิจการ นส. ณัฐริยา สุวรรณสินพันธุ์ นส. สุกนิช เลิศลาภวศิน นายชนากร อ้อมอกดากุล และนส. ดาราธิป เพ็ชรพรหม ที่เป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัย คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในระหว่างทำงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นส. กฤติกา วัฒนวิสุทธิ นายเอกลักษณ์ เข้มเพชร นายชินวัฒน์ ไตรศุภโชค นส. นมนรี สุขเกษม นส. รัตติกานต์ นำทรัพย์ นายศิษยพงศ์ หกสุวรรณ นายเฉลิมเกียรติ บุญลือ นส. กัตตินาฏ สกุสสวัสดิพันธ์ นส. เนตรชนก ศรีแสง และ นส. รัชนัน ชำนาญหอม ที่คอยช่วยเหลือเป็นกำลังใจ และดูแลกันและกันในการทำงานวิจัย

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้า ยาย น้องสาว และน้องชาย ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	5
2.2 กระบวนการทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำประปา	6
2.3 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM)	7
2.3.1 สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM)	8
2.3.1.1 สารฮิวมิก (Humic substances).....	8
2.3.1.2 พวกที่ไม่ใช่สารฮิวมิก (Nonhumic substances)	8
2.3.2 สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (Particulate Organic Matter, POM)	8
2.4 กรดฮิวมิก (Humic acid).....	9
2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของกรดฮิวมิก	9
2.4.2 สาเหตุที่ต้องกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำ	10
2.4.3 แนวทางการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำ.....	11
2.5 วัสดุดูดซับ	11
2.5.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	11

2.5.2 ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	12
2.5.2.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon, GAC).....	12
2.5.2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder activated carbon, PAC)	12
2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	13
2.6.1 นิยามของการดูดซับ	13
2.6.2 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)	13
2.6.3 ลักษณะของการดูดซับ	14
2.6.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ	15
2.6.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	17
2.6.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ.....	17
2.6.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ.....	18
2.6.5.3 สภาพในการดูดซับ	18
2.6.6 สภาพสมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ	19
2.6.6.1 สมการการดูดซับแบบแลงก์มีเยร์ (Langmuir adsorption isotherm)	19
2.6.6.2 สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm).....	21
2.6.7 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)	22
2.6.7.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction).....	23
2.6.7.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction)	23
2.7 ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone).....	25
2.7.1 ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลอน	25
2.7.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลอน	26
2.7.3 ความเร็วของการไหลในไฮโดรไซโคลอน (Velocity in hydrocyclone)	27
2.7.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity, V_y)	28
2.7.3.2 ความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity, V_z)	31
2.7.3.3 ความเร็วในแนวรัศมี (Radial Velocity, V_x)	32

2.7.4	ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน	33
2.7.4.1	สมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของอนุภาคและของไหล.....	33
2.7.4.2	รูปร่างทางเรขาคณิตของไฮโดรไซโคลน	34
2.7.5	ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน	40
2.7.5.1	ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)	40
2.7.5.2	ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)	41
2.7.6	การหาประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางโดยสมการทางคณิตศาสตร์	42
2.7.6.1	ห้องตกตะกอน (Sedimentation).....	42
2.7.6.2	ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)	44
2.8	แนวคิดของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์.....	46
2.9	ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
2.9.1	การศึกษากระบวนการดูดซับ	47
2.9.2	การออกแบบกระบวนการต่อเนื่องแบบตัวกลางเคลื่อนที่	57
2.9.3	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน.....	58
2.9.4	การศึกษากระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับ ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	60
2.9.5	สรุปข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	62
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	68
3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	68
3.1.1	อุปกรณ์ที่ติดตั้งในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	68
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	68
3.1.3	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	68
3.1.4	สารเคมี.....	69
3.2	แผนการทดลอง.....	71
3.3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	73
3.3.1	การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะของน้ำดิบจริงเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการ เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์.....	73

3.3.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสี ของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด.....	74
3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน ของไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ	76
3.3.4 การทดลองที่ 4 ทำการทดลองในระบบทีละเท (Batch experiment) เพื่อศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับของระบบไฮบริด	78
3.3.5 การทดลองที่ 5 ทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด	81
3.3.6 การทดลองที่ 6 ทำการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง(Continuous stirred-tank reactor) ของระบบ ไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก	83
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล	86
4.1 ผลการศึกษาลักษณะของน้ำดิบจริง.....	87
4.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซับ	88
4.2.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base.....	88
4.2.2 ชนิดของตัวดูดซับ	89
4.2.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ	91
4.2.4 ปริมาณตัวดูดซับ	92
4.2.5 ค่าพีเอช.....	95
4.2.6 ขนาดตัวดูดซับ	96
4.2.7 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetic).....	98
4.2.8 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)	100
4.2.9 การสังเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์โดยการใช้น้ำประปาแทนน้ำกลั่น	103
4.3 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการแยกถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไซโคลน	106
4.3.1 ความดันจ่ายเข้า.....	106
4.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์.....	108
4.3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน	111

4.3.4	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน	112
4.4	ผลการศึกษาคัดชั้นใน โรงงานนำร่องด้วยระบบทีละเท (Batch experiment)....	116
4.4.1	จลน์ศาสตร์การคัดชั้นภายใน โรงงานนำร่อง	116
4.4.2	ไอโซเทอมการคัดชั้นภายใน โรงงานนำร่อง.....	117
4.5	ผลการศึกษาคัดชั้นใน โรงงานนำร่องแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous).....	119
4.5.1	ผลการศึกษายัทธิพลของปริมาณและระยะเวลาในการกักเก็บ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	121
4.5.2	ผลการศึกษายัทธิพลของอัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด	122
4.5.3	การประมาณค่าความสามารถในการคัดชั้นของถ่านกัมมันต์จาก กราฟเบรคทูร	122
4.6	ผลการศึกษาคัดชั้นใน โรงงานนำร่องแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor).....	124
4.6.1	ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลน และการคัดชั้นด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดซึ่งเดินระบบแบบถังปฏิกรณ์ แบบถังกวนต่อเนื่องไปใช้ในการกำจัดกรดซิวมิค	124
4.6.2	ไอโซเทอมการคัดชั้นของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและ การคัดชั้นด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดซึ่งเดินระบบแบบถังปฏิกรณ์ แบบถังกวนต่อเนื่อง	126
4.7	การนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบไฮบริดเบื้องต้น.....	127
4.7.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบสามารถประมาณได้จากการ ประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method).....	127
4.7.2	การประเมินพื้นที่ที่ใช้สำหรับการแยกโดยไฮโดรไซโคลนเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนแบบธรรมดา	129
4.7.3	เปรียบเทียบระหว่างการใช้ใบพัด การใช้ไฮโดรไซโคลน และการใช้ใบพัด และไฮโดรไซโคลนในการกวนผสม.....	133
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	135
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	135
5.2	ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป	138
	รายการอ้างอิง... ..	139

ภาคผนวก... ..	142
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	143
ภาคผนวก ข รายการตัวอย่างการคำนวณ	173
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์... ..	181

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ความซับซ้อน และค่าใช้จ่าย ของกระบวนการ 3 กระบวนการในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ.....	7
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกรดฮิวมิก.....	10
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติของกรดฮิวมิกที่ใช้ในงานวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz.....	48
ตารางที่ 2.4	สรุปการทดลองกระบวนการดูดซับ	56
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบของไฮโดรไซโคลนในงานวิจัยของ Dwari และคณะ	59
ตารางที่ 2.6	องค์ประกอบของไฮโดรไซโคลนและอุปกรณ์ในงานวิจัยของ Rastogi และคณะ ..	61
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดเฉพาะไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย.....	69
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ในงานวิจัย	71
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.....	74
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.....	76
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.....	78
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.....	81
ตารางที่ 3.7	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.....	83
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base	89
ตารางที่ 4.2	ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยา.....	99
ตารางที่ 4.3	ค่าคงที่และตัวแปรของสมการไอโซเทอม.....	102
ตารางที่ 4.4	อัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าและทางออกต่างๆของไฮโดรไซโคลน.....	108
ตารางที่ 4.5	พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการคำนวณของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย	113
ตารางที่ 4.6	ค่าจากการคำนวณและทดลองของไฮโดรไซโคลน 50 มิลลิเมตร ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์	114
ตารางที่ 4.7	ผลการคำนวณประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ของ ไฮโดรไซโคลน 75 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์	114
ตารางที่ 4.8	ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาอันดับสอง	117

ตารางที่ 4.9	ค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จากการเดินระบบ แบบต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัมต่อลิตร	124
ตารางที่ 4.10	การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ.....	126
ตารางที่ 4.11	ข้อมูลผลการคำนวณหาความเร็วสุดท้ายในการแยกของอนุภาค	130
ตารางที่ 4.12	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ	132

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	กระบวนการผลิตน้ำประปา..... 5
ภาพที่ 2.2	โครงสร้างของกรวดฮิวมิก 9
ภาพที่ 2.3	ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถุกดูดซับในกระบวนการดูดซับ..... 14
ภาพที่ 2.4	กลไกการดูดซับ 14
ภาพที่ 2.5	การดูดซับของตัวดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์..... 16
ภาพที่ 2.6	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ 20
ภาพที่ 2.7	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช 22
ภาพที่ 2.8	ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลอน 26
ภาพที่ 2.9	ลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไฮโดรไซโคลอน..... 26
ภาพที่ 2.10	ภาพการไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลอน 27
ภาพที่ 2.11	ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลอน 28
ภาพที่ 2.12	ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท..... 30
ภาพที่ 2.13	การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_{ϕ})..... 30
ภาพที่ 2.14	การกระจายความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity, V_z) ภายในไฮโดรไซโคลอน 31
ภาพที่ 2.15	การกระจายความเร็วในแนวรัศมี (Radial Velocity, V_r) ภายในไฮโดรไซโคลอน..... 32
ภาพที่ 2.16	ถังตกตะกอนแบบอูคมคิตี..... 43
ภาพที่ 2.17	แนวคิดเกี่ยวกับระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนและถ่านกัมมันต์ 46
ภาพที่ 2.18	รูปแบบของถังปฏิกริยาที่ใช้ในงานวิจัยของ Dwari และคณะ 59
ภาพที่ 2.19	รูปแบบของถังปฏิกริยาที่ใช้ในงานวิจัยของ Rastogi และคณะ 61
ภาพที่ 2.20	ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor)..... 66
ภาพที่ 2.21	ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนและถ่านกัมมันต์ชนิดเคลื่อนที่แบบ ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง 66
ภาพที่ 3.1	รายละเอียดเฉพาะไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ในงานวิจัย..... 70
ภาพที่ 3.2	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 3 77
ภาพที่ 3.3	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 4 79
ภาพที่ 3.4	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 5 82

ภาพที่ 3.5	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 6	84
ภาพที่ 4.1	กราฟมาตรฐานสารละลายกรดฮิวมิก	87
ภาพที่ 4.2	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base	90
ภาพที่ 4.3	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน	92
ภาพที่ 4.4	จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน	93
ภาพที่ 4.5	ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน	94
ภาพที่ 4.6	ความเข้มของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับเพิ่มขึ้น	94
ภาพที่ 4.7	ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกที่ค่าพีเอชต่างกัน	96
ภาพที่ 4.8	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ต่างกัน	97
ภาพที่ 4.9	ไอโซเทอมการดูดซับของกรดฮิวมิกและถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200	101
ภาพที่ 4.10	เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับที่ได้จากข้อมูลการทดลองจริงกับ แบบจำลองไอโซเทอมแลงก์เมียร์และฟรุนดลิช	102
ภาพที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกและค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร	104
ภาพที่ 4.12	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด	105
ภาพที่ 4.13	ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าต่างกัน	107
ภาพที่ 4.14	ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ	109
ภาพที่ 4.15	ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเดินระบบที่เวลาเปลี่ยนไป	111
ภาพที่ 4.16	ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนขนาดต่างๆ	115
ภาพที่ 4.17	เปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการ และในโรงงานนำร่อง (Pilot-plant)	117
ภาพที่ 4.18	เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการ และในโรงงานนำร่อง (Pilot-plant)	119

ภาพที่ 4.19	กราฟเบรกทรู ที่ปริมาณตัวกลางดูดซับแตกต่างกัน	120
ภาพที่ 4.20	กราฟเบรกทรู ที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกัน	121
ภาพที่ 4.21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัด และปริมาณน้ำเสียที่ถูกบำบัด	123
ภาพที่ 4.22	ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหลของ ตัวกลางดูดซับต่างกัน	125
ภาพที่ 4.23	เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและใน โรงงานนำร่องที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous operating)	127
ภาพที่ 4.24	การวิเคราะห์กระบวนการดูดซับโดยวิธีทางกราฟ (Graphical method)	128
ภาพที่ 4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอน หรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค	131
ภาพที่ 4.26	ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไลโซโคลนและ การตกตะกอนแบบ โคค	132
ภาพที่ 4.27	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ที่ สภาวะในการเดินระบบแตกต่างกัน	134

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหตุการณ์อุทกภัยเมื่อปลายปี 2554 ได้ส่งผลกระทบต่อน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในขณะนั้น การที่คุณภาพของน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปามีคุณภาพเปลี่ยนไป ทำให้สีของน้ำประปาไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งในเหตุการณ์ดังกล่าวการประปานครหลวงได้ดำเนินการแก้ไขปัญหารีเอตส์ที่เกิดขึ้น โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ในการดูดซับสี แต่ก็พบปัญหาที่ตามมาคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่รวมตัวกับฟล็อก (Floc) ไปทำให้เครื่องรีดตะกอนแบบ Filter press เกิดการอุดตันหรือหนีขนาด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแม้จะแก้ปัญหารีเอตส์ได้แต่ก็มีปัญหาเรื่องระบบกำจัดตะกอนเพิ่มขึ้นมา ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะหาเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมและสามารถใช้ได้อย่างฉับพลันเพื่อแก้ไขปัญหารีเอตส์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงระบบการผลิตน้ำประปาตามปกติ

สีในแหล่งน้ำเกิดจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) โดยสารดังกล่าวเกิดจากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ สามารถแบ่งตามสถานะได้เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (Particulate Organic Matter, POM) และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM) สารอินทรีย์ที่พบมากในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ คือ สารฮิวมิก (Humic Substance) ส่วนใหญ่พบในรูปกรดฮิวมิก (Humic acid) แม้จะไม่ก่อให้เกิดพิษโดยตรงแต่ก็ก่อให้เกิดผลกระทบข้างเคียงต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เช่น ทำให้เกิดสีในน้ำ มีความสามารถในการจับโลหะและสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ เช่น ยาฆ่าแมลง นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ทำให้เกิดสารในกลุ่มไตรเฮโลมีเทน (Trihalomethanes, THM) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Maghsoodloo และคณะ, 2011) โดยปกติแล้วสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป (Conventional processes) โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำสามารถกำจัดได้ง่ายเหมือนกับอนุภาคทั่วไปที่ทำให้เกิดความขุ่น ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำโดยเฉพาะกรดฮิวมิกยังไม่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีดังกล่าว (ปรากฏการณ์ ผาติสุนทร, 2546) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากระบบ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ถือเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ดีมาก ความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบปานกลางเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีชนิดอื่น

วัสดุดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โดยที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC) และถ่าน

กัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granula Activated Carbon, GAC) โดยถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีความนิยมในการนำมาใช้เป็นอย่างมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงและง่ายต่อการนำมาใช้งาน อย่างไรก็ตาม PAC ยังมีข้อจำกัดในการใช้เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีระบบที่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแยก PAC ออกจากน้ำและ/หรือตะกอน การที่มี PAC ปะปนไปกับตะกอนจะส่งผลกระทบต่อระบบกำจัดตะกอน เช่น เครื่องรีดตะกอนแบบ Filter press อันเนื่องมาจากการอุดตันและลักษณะของแผ่นกรอง ส่วนการกำจัด PAC โดยการกรองก็อาจทำให้เกิดการอุดตันของชั้นกรองและส่งผลให้ต้องล้างย้อนระบบบ่อยครั้ง

การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับจะออกแบบในรูปของถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) เนื่องจากถังปฏิกรณ์ดังกล่าว อาศัยข้อมูลไอโซเทอมในการออกแบบถังปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว ทำให้ช่วยลดความยุ่งยากในการออกแบบประสิทธิภาพของระบบสามารถคำนวณคร่าวๆ ได้โดยสมการคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ยังสามารถทำนายประสิทธิภาพของระบบได้แม่นยำและง่ายแม้ว่าสถานะในการเดินระบบจะเปลี่ยนแปลง (Islam และคณะ, 2009) อย่างไรก็ตามเมื่อเราออกแบบระบบดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงต่อมา คือ การออกแบบระบบแยกตัวดูดซับ เนื่องจากเราไม่สามารถปล่อยให้ตัวดูดซับปะปนไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัด แต่ในขณะที่เดียวกันก็ไม่สามารถปล่อยให้ปะปนไปกับตะกอนได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สามารถแยกตัวดูดซับออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาเช่นกัน โดยไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจในการนำมาใช้เนื่องจากประโยชน์ของไฮโดรไซโคลอนที่ว่า ราคาถูกและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง ดำเนินการและติดตั้งได้ง่าย ไม่ต้องการเครื่องมืออื่นประกอบการทำงานมาก และมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกชนิดอื่น (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นทำให้เกิดแนวคิดของระบบไฮบริด โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการกำจัดครดฮิวมิกซึ่งเป็นตัวแทนของสี และใช้ไฮโดรไซโคลอนแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่เนื่องจากระบบดังกล่าวยังมีผู้ศึกษาไม่มากนัก ทำให้ยังขาดข้อมูลในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพในหลายด้าน เช่น ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงาน และรูปแบบในการออกแบบระบบ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับครดฮิวมิกและการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดของไฮโดรไซโคลอน อันจะนำไปสู่การออกแบบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการกำจัดครดฮิวมิกออกจากน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด อันได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก พีเอช ชนิด ขนาดและปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ

1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด อันได้แก่ ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน และความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน

1.2.3 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด อันได้แก่ อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด ปริมาณและระยะเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับทดลอง (Pilot scale) โดยดำเนินการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 น้ำที่จะใช้ในการทดลองเป็นน้ำสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมกรดฮิวมิกให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ

1.3.3 ไฮโดรไซโคลนที่ใช้มี 2 ขนาด คือ ไฮโดรไซโคลนยี่ห้อ NEYRTEC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ทำจากโพลียูเรเทน (Polyurethane)

1.3.4 กรดฮิวมิกที่ใช้ในการทดลองเป็นกรดฮิวมิกจากบริษัท ACROS Organics Ltd.

1.3.5 ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ Filtrasorb 200 ของบริษัท Calgon carbon corporation และ Hydrosorb bituminous coal ของบริษัท Aqua kinetic Ltd. โดยจะใช้ตะแกรงแยกขนาด (Molecular sieve) คัดจนได้ขนาดที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ 12×14, 16×18, 20×24 และ 30×35 เมช (Mesh)

1.3.6 ค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกซึ่งใช้เป็นตัวแทนของสี วัดโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

1.3.7 การพิจารณาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ในการดำเนินการของระบบไฮบริดจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการกำจัดสารถูกดูดซับออกจากของไหลด้วยกระบวนการดูดซับ และส่วนของการแยกตัวดูดซับออกจากของไหลด้วยไฮโดรไซโคลน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดไขมันของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.4.2 ทราบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากของเหลว

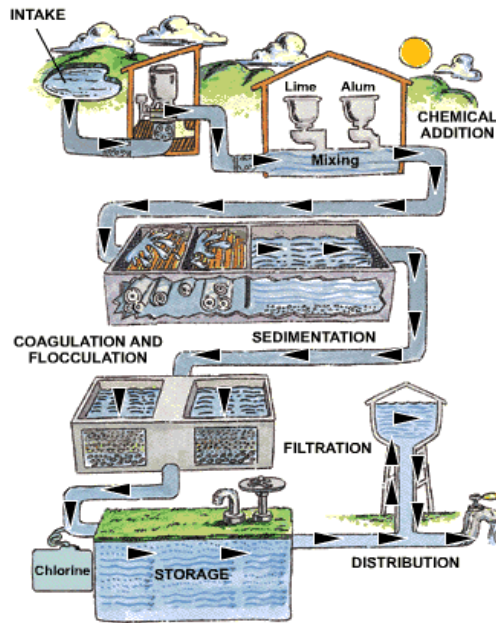
1.4.3 ได้ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบระบบไฮบริด

1.4.4 ทราบความเป็นไปได้ในการใช้ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ในการบำบัดสีที่เกิดจากกรดไขมันในกระบวนการผลิตน้ำประปา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (มันติน ตันฑุลเวศน์, 2542)



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา

(The City of Greeley, 2013: online)

กระบวนการผลิตน้ำประปาประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ ขณะที่น้ำดิบไหลมาตามคลองประปา น้ำดิบจะสัมผัสอากาศและแสงแดดแล้วจะตกตะกอนตามธรรมชาติทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ในระหว่างนั้นจะมีการกำจัดถุงพลาสติก เศษไม้ สาหร่าย สวะ ด้วยตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียด กันไว้ที่หน้าสถานีสูบน้ำดิบ เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเหล่านี้เข้าสู่กรรมวิธีการผลิตน้ำประปา ต่อมาน้ำดิบจะผ่านเข้าสู่กระบวนการ โคแอกกูเลชัน-ฟลอคกูเลชัน (Coagulation-Flocculation processes) ภายในระบบดังกล่าว มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 อย่าง คือ ถังกวนเร็ว (Rapid mixing tank) และถังกวนช้า (Slow mixing tank) โดยถังกวนเร็วมีหน้าที่กระจายสารเคมีไปให้ส่วนต่างๆ ของน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้น ส่วนถังกวนช้าซึ่งได้รับน้ำจากถังกวนเร็วมีหน้าที่สร้างสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว) เพื่อให้รวมตัวกันเป็นฟล็อก ต่อมาจะทำการแยกฟล็อกดังกล่าวออกจากน้ำ ซึ่งวิธีการแยกฟล็อกได้แก่ การตกตะกอน (Sedimentation) ฟล็อกที่มีขนาดโตขึ้นจะตกลงสู่ก้นถัง

เหลือแต่น้ำใสไหลไปยังบ่อกรองสำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนจะใช้เวลา 2 ชั่วโมง ความขุ่นของน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนจะมีค่าความขุ่นไม่เกิน 5 NTU น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลมายังบ่อกรองน้ำ (Filtration) ซึ่งมีผงถ่านแอนทราไซค์และทรายกรอง เพื่อแยกเอาตะกอนที่ละเอียดออกอีกครั้งหนึ่งน้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะใสมาก มีความขุ่นไม่เกิน 2 NTU ถังกรองที่ใช้เป็นแบบชนิดกรองเร็ว เมื่อใช้งานได้ประมาณ 48 ชั่วโมง จะต้องมีการล้างย้อน (Back wash) โดยการพ่นลมและน้ำขึ้นมาจากใต้บ่อกรอง เพื่อให้ทรายขยายตัวและให้ตะกอนที่อยู่ติดหน้าผิวทรายไหลตามน้ำออกไป ต่อจากนั้นน้ำจะถูกส่งไปยังระบบการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) น้ำที่ได้อาจมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยจะเติมคลอรีนเป็นการฆ่าเชื้อโรค (Post-chlorination) ซึ่งสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ที่สำคัญยังมีคลอรีนหลงเหลือ (Free residual chlorine) ติดไปกับน้ำ เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนเข้ามาภายหลังได้ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกนำไปเก็บไว้ในถังน้ำใสเพื่อรอการสูบจ่ายต่อไป การสูบจ่ายน้ำประปาสามารถทำได้โดยการปล่อยน้ำจากหอถังสูงหรือสูบน้ำเข้าไปในระบบท่อจ่ายน้ำเพื่อเพิ่มแรงดันน้ำ ทำให้ส่งน้ำไปได้ไกลมากขึ้น

2.2 กระบวนการทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำประปา (Conventional process) (ปรากฏการณ์ ผาติสุนทร, 2546)

โดยปกติแล้วสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป (Conventional processes) โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำสามารถกำจัดได้ง่ายเหมือนกับอนุภาคทั่วไปๆที่ทำให้เกิดความขุ่น แม้กระบวนการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ แต่กระบวนการดังกล่าวยังไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ โดยเฉพาะกรดฮิวมิกได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ ที่จะควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ในทางกลับกันอาจยังเพิ่มปัญหาให้กับน้ำประปาที่ผลิตได้ โดยกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำต่ำย่อมทำให้มีสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเหลืออยู่ในน้ำปริมาณมากและหากการฆ่าเชื้อโรคนำถึงเพียงแต่ปริมาณคลอรีนที่ตกค้างอยู่ในน้ำประปาอาจก่อให้เกิดสารข้างเคียงที่เกิดจากการใช้สารฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-product, DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน ในปริมาณสูงซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่มีอันตรายต่อมนุษย์

ในปัจจุบันมีกระบวนการมากมายที่ถูกเลือกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำ เช่น กระบวนการ โอโซนเนชั่น (Ozonation) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การใช้เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane technology) กระบวนการทำให้ลอยตัว

(Flotation) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) โดยกระบวนการดูดซับถือเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ในปัจจุบัน (Maghsoodloo และคณะ, 2011) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบปานกลาง เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ความซับซ้อน และค่าใช้จ่ายของกระบวนการ 3 กระบวนการในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (ปรากฏณ์ ผาติสุนทร, 2546)

กระบวนการที่ใช้	ประสิทธิภาพ	ความซับซ้อนของกระบวนการ	ค่าใช้จ่าย
โคแอกกูเลชัน	พอใช้-ดี	ต่ำ-ปานกลาง	ต่ำ-ปานกลาง
การดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกล็ด	ดีมาก	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง
ระบบนาโนฟิลเตรชัน	ยอดเยี่ยม	ปานกลาง	ปานกลาง-สูง

2.3 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM)

(Nieuwenhuijzen และ Graaf, 2011)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) ที่ถูกพบในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยทั่วไปจะเกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ และเกิดจากกระบวนการสลายตัวของจุลินทรีย์ต่างๆ โดยสามารถพบการปนเปื้อนในรูปของอนุภาค (Particulate organic matter) หรือในรูปสารละลาย (Dissolved organic matter)

$$\text{NOM} = \text{DOM} + \text{POM} \quad (2.1)$$

โดย NOM คือ สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter)
 DOM คือ สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved organic matter)
 POM คือ สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (Particulate organic matter)

2.3.1 สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM)

คือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนที่ขนาด 0.45 ไมโครเมตรได้ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สารฮิวมิก (Humic substances) และพวกที่ไม่ใช่สารฮิวมิก (Nonhumic substances)

2.3.1.1 สารฮิวมิก (Humic substances)

น้ำมีสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เป็นสารฮิวมิกประมาณ 45-65% สารฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง มีโครงสร้างซับซ้อนและคงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มาก มีสภาพเป็นกรด มีสีน้ำตาลหรือดำ ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก คือ สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds) ซึ่งสลายตัวได้ยาก และมีโมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) กรดอะมิโน (Amino acid) เพปไทด์ (Peptide) โปรตีน (Protein) หรือ ไอออนต่างๆ เข้ามาเกาะด้วย สารฮิวมิกที่ละลายน้ำประกอบด้วย กรดฮิวมิก (Humic acid) กรดฟัลวิก (Fulvic acid) และ ฮิวมิน (Humin)

2.3.1.2 พวกที่ไม่ใช่สารฮิวมิก (Nonhumic substances)

น้ำมีสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ไม่ใช่สารฮิวมิกประมาณ 35-55% เป็นส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของพีชชั้นสูง สัตว์และจุลินทรีย์ทั่วไป สามารถแยกและระบุงค์ประกอบทางเคมีได้อย่างชัดเจน เป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (Hydrophilic) มีโครงสร้างของโมเลกุล ไม่ซับซ้อน ถูกย่อยสลายได้ง่าย ไม่มีสี เช่น คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) โปรตีน กรดอะมิโน (Amino acid) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งพวก อะลิฟาติก (Aliphatic compounds) อะโรมาติก (Aromatic) แอลกอฮอล์ (Alcohol) ออกซิน (Auxin) อัลดีไฮด์ (Aldehyde) และกรดอินทรีย์ต่างๆ

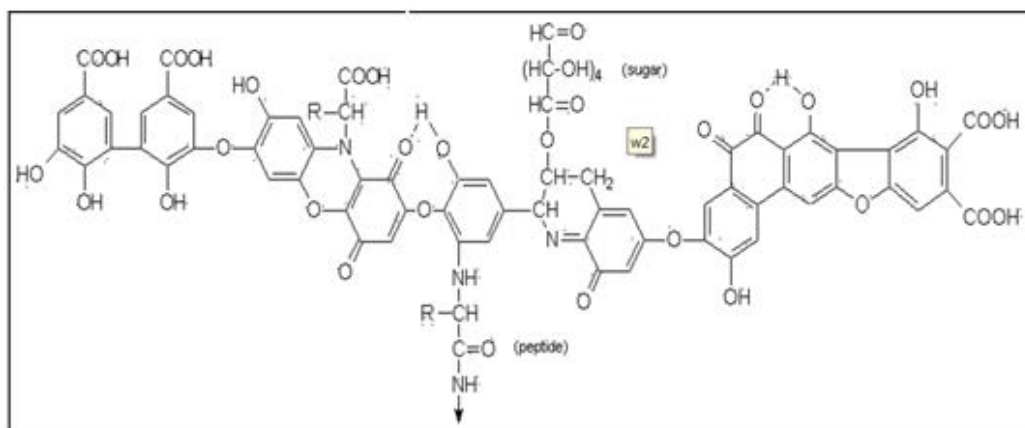
2.3.2 สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (Particulate Organic Matter, POM)

คือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนที่ขนาด 0.45 ไมโครเมตรได้ สามารถกำจัดได้ง่ายโดยกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป (Conventional process) เหมือนกับอนุภาคทั่วไปที่ทำให้เกิดความขุ่น

2.4 กรดฮิวมิก (Humic acid) (ปรากฏการณ์ ชาติสุนทร, 2546)

2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของกรดฮิวมิก

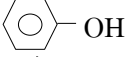
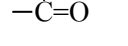
กรดฮิวมิกมีสูตรโครงสร้างและสูตรโมเลกุลที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า กรดฮิวมิกเป็นสารโพลีเมอร์ ที่ประกอบด้วย อะโรมาติกโมโนเมอร์ (Aromatic monomer) ในปริมาณที่ต่างกันไป โครงสร้างพื้นฐานที่เป็นแกนกลาง (Core structure) ของกรดฮิวมิก อย่างน้อยจะต้องประกอบด้วย อะโรมาติกพอลิเมอร์ (Aromatic polymer) ซึ่งเกิดจากการควบแน่นของสารอะโรมาติก ประเภทได หรือ ไตร-ไฮดรอกซิล ฟีนอล (Di- or Tri-hydroxyl phenol) เชื่อมโยงด้วยพันธะไอโซ - แอลเคน ($-O-(CH_2)_n-$) เอมีนทุติยภูมิ ($-NH-$) เอมีนตติยภูมิ ($-N-$) ไธโออีเทอร์ ($-S-$) หรือหมู่อื่น ๆ ซึ่งมีทั้งแอลดีไฮด์ ($-C=OH$) และ ควิโนน ($O=C_6H_4=O$) รวมอยู่ด้วย อีกทั้งยังประกอบด้วยกลุ่มทำปฏิกิริยา (Functional groups) หลายกลุ่ม เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และคีโตน (Ketone) โดยกลุ่มทำปฏิกิริยาที่เป็นคาร์บอกซิลิก มีปริมาณถึง 60-90% ของกลุ่มที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมด ดังนั้นกรดฮิวมิกจึงมีประจุลบในช่วงค่าพีเอชของน้ำธรรมชาติและค่าพีเอชที่สูงกว่านั้น และมีค่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 20,000-1,360,000 กรัม



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของกรดฮิวมิก

(ปรากฏการณ์ ชาติสุนทร, 2546)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกรดฮิวมิก (Snoeyink และ Jenkins, 1980)

คุณสมบัติ	กรดฮิวมิก
องค์ประกอบธาตุ (%โดยน้ำหนัก)	
คาร์บอน (Carbon)	50-60
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	4-6
ไนโตรเจน (Nitrogen)	2-4
ซัลเฟอร์ (Sulfur)	1-2
ออกซิเจน (Oxygen)	30-35
ละลายในกรดแก่ (pH <1)	ไม่ละลาย
ช่วงน้ำหนักโมเลกุล (MW)	100-หลายล้าน
Carboxyl -COOH	14-45
Phenol  OH	10-38
Alcohol  -C-OH	13-15
Carbonyl  -C=O	4-23
Methoxyl -O-CH ₃	1-5

2.4.2 สาเหตุที่ต้องกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำ

(Lorenc-Grabowska และ Grylewicz, 2005; Maghsoodloo และคณะ, 2011)

- 1) ทำให้เกิดสีในน้ำก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น
- 2) มีความสามารถในการจับโลหะ และสารอินทรีย์ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic organic chemical) เช่น ยาฆ่าแมลง
- 3) มีส่วนประกอบของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่อาจทำปฏิกิริยากับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) ทำให้สารเหล่านี้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้นได้ เช่น ทำให้เกิดสารในกลุ่มไตรเฮโรมีเทน (Trihalomethanes, THM) ซึ่งเป็นสารที่เชื่อว่าเป็นสารก่อมะเร็ง
- 4) ทำให้ต้องเติมปริมาณสารฆ่าเชื้อโรคมากขึ้นในการผลิตน้ำประปา
- 5) มีการศึกษาพบว่าการได้รับกรดฮิวมิกเป็นจำนวนมากเป็นปัจจัยก่อให้เกิดโรคเท้าดำ (Blackfoot disease) มีลักษณะของอาการ คือ ฝ่าเท้า จะมีลักษณะหนา และมีสีดำคล้ำ

2.4.3 แนวทางการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำ

(Nieuwenhuijzen และ Graaf, 2011)

- เนื่องจากสารฮิวมิกมีขนาดโมเลกุลใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำจัดสารฮิวมิกออกจากน้ำโดยตรงได้โดยการกรองผ่านเมมเบรนที่มีขนาดเล็ก (Nano-filtration)
- เนื่องจากโมเลกุลของสารฮิวมิกมีประจุเป็นลบที่ฟิเอชทั่วไปที่ใช้ในการผลิตน้ำดื่ม ดังนั้นสารฮิวมิกสามารถกำจัดได้โดยการทำโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ด้วยกระบวนการดูดติดผิวด้วยโลหะไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide) และตามด้วยกระบวนการแยกฟล็อก (Floc separation)
- เนื่องจากสารฮิวมิกมีประจุเป็นลบทำให้สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) หรือกระบวนการดูดซับ (Adsorption)
- เนื่องจากสีของสารฮิวมิกเกี่ยวข้องกับโครงสร้างอะโรมาติก (Aromatic structure) และพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) ดังนั้นสีสามารถกำจัดได้ด้วยการทำลายพันธะดังกล่าวโดยการเติมตัวออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidant)
- สารฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและค่อนข้างคงทนไปทางสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายไม่ได้ (Non-biodegradable) อย่างไรก็ตามการเติมตัวออกซิไดซ์อย่างแรงอาจทำให้สารฮิวมิกโมเลกุลใหญ่สลายตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง และสามารถกำจัดได้โดยระบบตัวกรองชีวภาพ (Biofiltration)

2.5 วัสดุดูดซับ

2.5.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ผลิตจากวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว ปิโตรเลียม และไม้ โดยการทำให้เกิดโพรงภายในหรือรูพรุนภายในเนื้อคาร์บอนให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ วัตถุดิบจะถูกนำมาเผาในเตาอบอากาศจนเป็นถ่าน หลังจากนั้นจะถูกนำมาเผาเร่งที่อุณหภูมิสูงจนเกิดรูพรุน (Porosity) ความพรุนจะแทรกอยู่ในเนื้อของถ่านและสามารถวัดออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 500-1500 ตารางเมตร ต่อ 1 กรัม ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุนได้ 3 ประเภท คือ รูพรุนมีค่ามากกว่า 50 นาโนเมตร (Macropores) รูพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 2 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร (Mesopores) และรูพรุนมีค่าต่ำกว่า 2 นาโนเมตร (Micropores) (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

2.5.2 ประเภทของถ่านกัมมันต์ (มันลิน ตันกุลเวสม์, 2542)

2.5.2.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon, GAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดในช่วง 0.2-5 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่ใช้กับของเหลวและก๊าซ

- ข้อดีของการใช้ GAC

- สามารถฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ได้

- ข้อเสียของการใช้ GAC

- มีโอกาสสูญเสียคาร์บอน 5% ในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากต้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมากๆ ทำให้กลายเป็นผงละเอียด

2.5.2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder activated carbon, PAC)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.18 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ได้กับของเหลว การเติม PAC อาจเติมพร้อมกับสารสร้างตะกอน ซึ่ง PAC ที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก (Floc) และสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยการตกตะกอนหรือการกรอง

- ข้อดีของการใช้ PAC

- PAC มีราคาถูกกว่า GAC ประมาณ 2-3 เท่า
- การเพิ่มหรือลดปริมาณ PAC สามารถทำได้ทันทีและสะดวก เพื่อให้สอดคล้องกับความแปรปรวนของคุณภาพน้ำดิบ
- ไม่ต้องมีการลงทุนเบื้องต้นเป็นเงินมากๆ เพราะการใช้ PAC มีวิธีการใช้เหมือนกับสารเคมีอื่นๆในกระบวนการผลิตน้ำประปา
- การดูดซับพิษเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลหรือคอลลอยด์สามารถสัมผัสกับผิว PAC ได้ง่าย

- ข้อเสียของการใช้ PAC

- การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) PAC ที่ใช้จนหมดประสิทธิภาพแล้วมีการลงทุนค่อนข้างสูงและไม่คุ้มค่า ดังนั้นการใช้ PAC จึงมักใช้แล้วทิ้ง
- ถึงแม้ว่า PAC สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำให้เหลือน้อย แต่ถ้าต้องการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ให้หมดจะต้องใช้ PAC ในปริมาณมาก การใช้ PAC ไม่ควรใช้เกิน 25-50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน
- PAC ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิก เนื่องจาก PAC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีมวลโมเลกุลเล็ก (Non-humic)

ได้ศึกษาสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ (Humic) (Huang และ Yeh, 1999)

- อาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการบำบัดตะกอนได้ เช่น ก่อให้เกิดการอุดตันและนิกษาคของเครื่องรีดตะกอน

2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

2.6.1 นิยามของการดูดซับ (มันลิน ดันทุลเวสม์, 2542)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass transfer) ชนิดหนึ่ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในก๊าซหรือของเหลวจะมีการเคลื่อนที่โดยการแพร่ (Diffusion) มาเกาะจับหรือติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกิดกระบวนการดูดซับเรียกว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

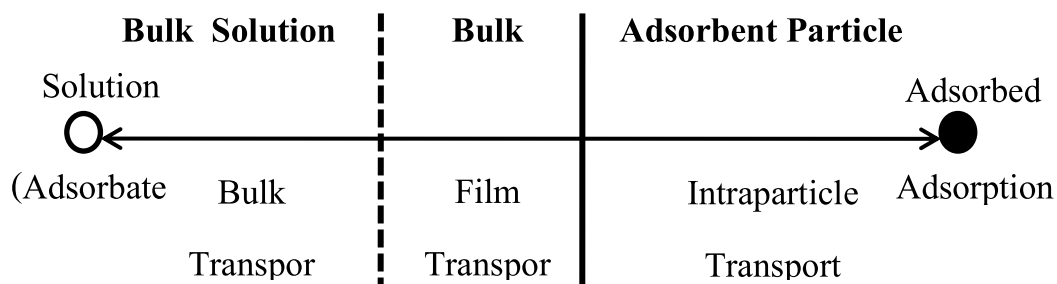
2.6.2 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism) (เดชา นัทรศิริเวช, 2552)

กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 3 ขั้นตอนติดต่อกัน แสดงดังภาพที่ 2.3 และ 2.4

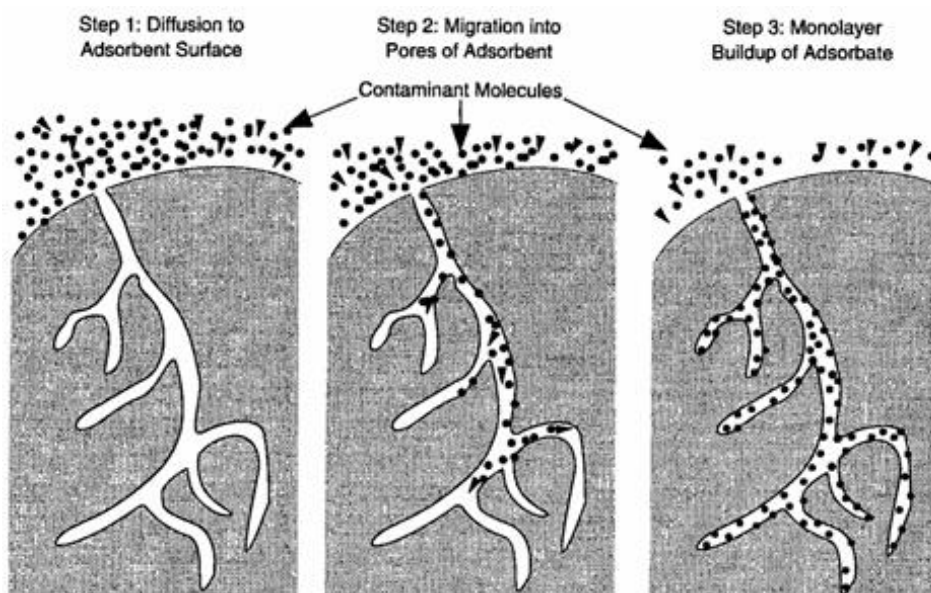
ขั้นตอนที่ 1 (Bulk transport) โมเลกุลของสารที่ละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ โดยขั้นตอนนี้เกิดขึ้นเร็วที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ตัวดูดซับ การขนส่งในขั้นนี้เป็นกระบวนการที่เกิดการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลว (Film diffusion) ถือเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle transport หรือ Pore transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลสารที่ละลายในของเหลวเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ
(กรรณิการ์ รั๊กกิจ, 2547)



ภาพที่ 2.4 กลไกการดูดซับ (กรรณิการ์ รั๊กกิจ, 2547)

2.6.3 ลักษณะของการดูดซับ (เดชา นัทรศิริเวช, 2552)

ปรากฏการณ์ของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะ โครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสมบัติของตัวดูดซับ ลักษณะเหล่านี้ทำให้สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน โดยลักษณะการดูดซับมี 2 ประเภท

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ทำให้องค์ประกอบยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) และแรงแวนเดอวาลล์ (Van der Waal's force)

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับเพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้

2.6.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (เดชา นัศรศิริเวช, 2552)

การดูดซับตัวถูกละลายในสารละลาย อาจเกิดจากการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ หรือแรงทางเคมี โดยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอวาลล์ และแรงไฟฟ้าสถิตย์ เกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากอันตรกิริยาในช่วงสั้นๆ (Interaction) รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand exchange) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)

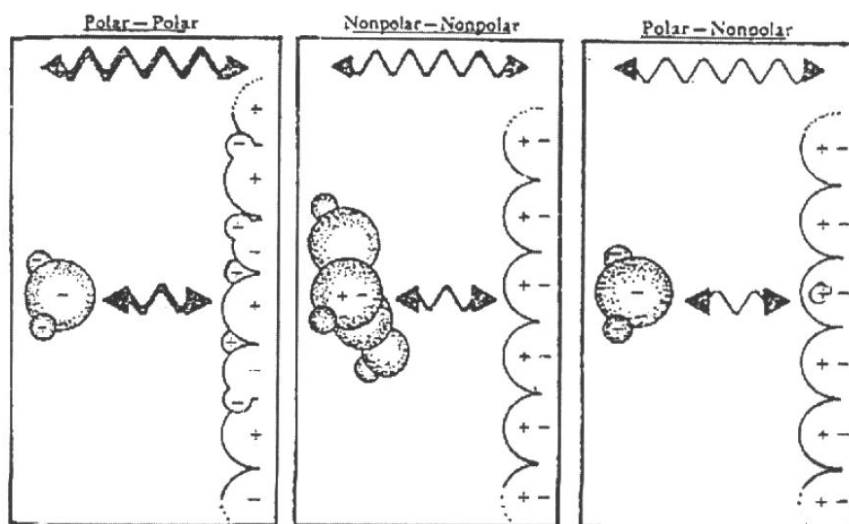
1) แรงแวนเดอวาลล์ (Van der Waal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2) แรงทางไฟฟ้าสถิตย (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆเหล่านี้เกิดจากผล 3 อย่าง ดังภาพที่ 2.5

2.1) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

2.2) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

2.3) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากกาเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน



ภาพที่ 2.5 การดูดซับของตัวดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย

(กฤษณ์ พลรัตน์, 2547)

3) แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับกับไอออนของตัวถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แรงทางเคมีมีลักษณะเป็นพันธะที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือ

ให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์ และไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มาก และมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ

1) การแยกโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับไม่สามารถทำได้หรือทำได้ยาก ขณะที่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับทางกายภาพสามารถแยกออกได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน

2) ในการดูดซับทางเคมีโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะสร้างพันธะเคมีที่ผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดจากผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุลและอิทธิพลของการแพร่

3) การดูดซับทางเคมีนั้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และการดูดซับจะหยุดลง เมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวดูดซับหมดไป ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์นั้นตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer)

2.6.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

(Cooney, 1999; มั่นสิน ตันฑุลเวศม์, 2542; เฉชา นัทรศิริเวช, 2552)

ตัวถูกดูดซับจะสามารถเกาะ หรือกระจายที่ผิวของตัวดูดซับได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และสภาวะในการดูดซับ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

2.6.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorbent)

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure)

พื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามรูพรุนของตัวดูดซับก็ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับเช่นเดียวกันเมื่อรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเนื่องจากตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปถูกดูดซับภายในรูพรุนได้

2) ขนาดของตัวดูดซับ (Particle size)

ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากด้วยปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันขนาดของตัวดูดซับที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนหลายๆความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน

3) หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่ผิวหน้า

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้

2.6.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)

1) ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่ตัวถูกละลาย (ตัวถูกดูดซับ) แยกตัวออกจากสารละลายแล้วมายึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับ เช่น เมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย สารที่ละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำที่สูงทำให้ยากต่อการถูกดูดซับ

2) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่อขนาดและน้ำหนักของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น สารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

3) ความมีขั้วของโมเลกุล (Polarity)

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสภาพขั้ว สำหรับกรณีที่โมเลกุลของตัวทำละลายมีสภาพความเป็นขั้วสูงกว่าความเป็นขั้วที่ผิวของตัวดูดซับ

2.6.5.3 สภาวะในการดูดซับ

1) ค่าพีเอช (pH)

นอกจากค่าพีเอชจะมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่างๆแล้ว ค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็น ไอออน เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับ ไอออนอื่นๆ ไฮโดรเจน ไอออน และ ไฮดรอกไซด์ ไอออนสามารถดูดซับ ได้ค่อนข้างแข็งแรง

2) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิจะส่งผลต่อทั้งอัตราเร็วในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นและเนื่องจากกระบวนการดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมียังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสาร โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายก็จะสูงขึ้นด้วยทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

3) ความปั่นป่วน (Turbulence or Mixing)

โดยปกติแล้ว อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นกับการแพร่ภายนอก (ฟิล์ม) และการแพร่ภายในรูพรุน เมื่อระบบมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มของไหลที่อยู่โดยรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปดูดซับบนพื้นผิวได้ยาก ดังนั้นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับคือการแพร่ภายนอก แต่หากระบบมีความปั่นป่วนสูงจะเกิดเพียงฟิล์มบางๆบนพื้นผิวตัวดูดซับในกรณีนี้การแพร่ภายในจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับแทน

2.6.6 สภาวะสมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Equilibrium adsorption and adsorption isotherm) (Cooney, 1999)

ในกระบวนการดูดซับ เมื่อตัวดูดซับได้สัมผัสกับตัวดูดซับในช่วงเวลาที่นานพอ สมดุลการดูดซับจึงเกิดขึ้น โดยที่ปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น และ/หรือ ปริมาณตัวดูดซับ โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ ซึ่งเรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

2.6.6.1 สมการการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

มีสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูดซับจะเกิดที่ผิวตัวกลางดูดซับเพียงชั้นเดียวไม่มีการเคลื่อนที่ได้ของอิสระของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ สรุปสมมติฐานได้ดังนี้

- ตัวถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
- ทุกบริเวณในการดูดซับมีพลังงานในการดูดซับค่าเท่ากัน
- พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว

ซึ่งสามารถแสดงลักษณะสมการได้ ดังต่อไปนี้

$$q = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.2)$$

- โดย q คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
 q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับ
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
 b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตร/มิลลิกรัม)

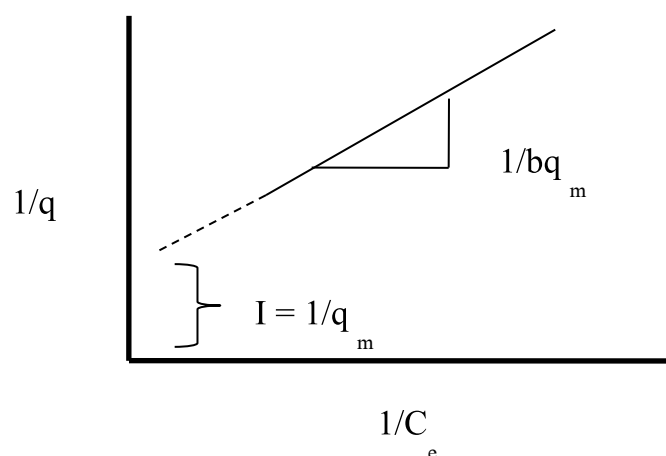
เมื่อ q เข้าสู่อินฟินิตี้ และ C_e เข้าสู่อินฟินิตี้ (Infinity) จะได้สมการเป็น

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.3)$$

เมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{C_e} \left(\frac{1}{b q_m} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/bq_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$ ดังสมการที่ 3.3 แสดงได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Cooney, 1999)

2.6.6.2 สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

- การดูดซับเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)
- พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface)
- การดูดซับเป็นแบบผันกลับได้ (Reversible adsorption)
- โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความอิสระที่จะจับหรือเกาะได้ทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดซับ

ซึ่งมีสมการดังนี้คือ

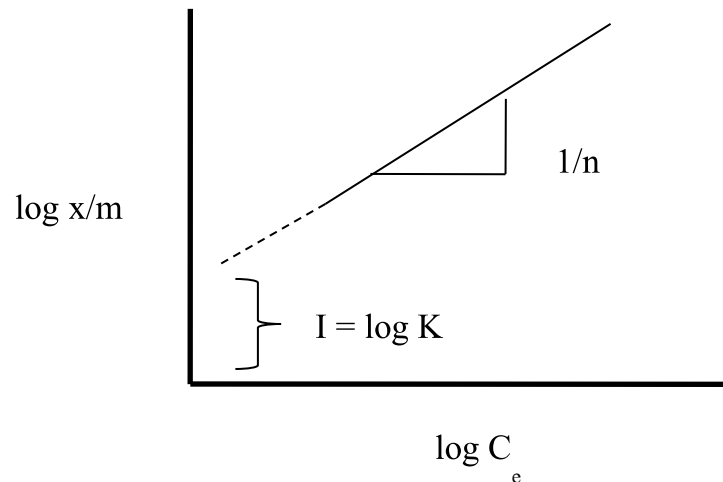
$$\frac{X}{m} = KC_e^{1/n} \quad (2.5)$$

โดย	X	คือ น้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)
	M	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)
	C _e	คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
	K	คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
	1/n	คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตร/กรัม)

จากสมการที่ 2.5 สามารถเขียนในรูป logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log\left(\frac{X}{m}\right) = (\log K) + \left(\frac{1}{n}\right) (\log C_e) \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(X/m)$ กับ $\log C_e$ จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน $1/n$ และ $\log K$ จุดตัดแกน y ของ $\log(X/m)$ ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) จากสมการที่ 2.6 แสดงได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนคลิช (Cooney, 1999)

2.6.7 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

(Rossman, 1997; อิศริยาภรณ์ บุญยยืน, 2552)

จลนศาสตร์การดูดซับ คือความสัมพันธ์ของอัตราการดูดซับกับเวลา โดยปกติแล้วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับอัตราการดูดซับจะมีค่ามาก และจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยสมการที่นิยมใช้อธิบายจลนศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) และปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction)

อัตราเร็วของปฏิกริยา (Rate of reaction) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยอัตราเร็วของปฏิกริยาจะต้องเท่ากันไม่ว่าจะคิดจากสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ โดยอัตราเร็วของปฏิกริยาจะสามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า กฎของอัตราเร็ว (Rate law)

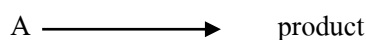
อันดับของปฏิกริยา (Order of reaction) หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกริยากับความเข้มข้นของสาร

$$\text{กฎของอัตราเร็ว (Rate law)} = k[C]^n \quad (2.7)$$

- | | |
|-------|--|
| โดย C | คือ ความเข้มข้นของสารที่สนใจ |
| K | คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็ว ณ อุณหภูมิใดๆ |
| n | คือ อันดับของปฏิกริยา |

2.6.7.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction)

ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 หมายถึง ปฏิกิริยาที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว โดยปฏิกิริยาที่เกิด คือ



$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^1 = k[A] \quad (2.8)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการดังกล่าวจากที่เวลาเริ่มต้น (t_0) และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $[A_0]$ จนถึงเวลาใดๆ จะได้ว่า

$$-\int_{[A_0]}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = k \int_0^t dt \quad (2.9)$$

$$\log[A_0] = \log[A] + \frac{kt}{2.303} \quad (2.10)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) คือ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e + \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2.11)$$

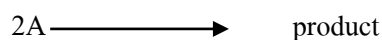
โดย	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ. ที่จุดสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ. ที่เวลาต่างๆ (mg/g)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min^{-1})

เมื่อนำสมการที่ 2.11 มาเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน $k_1/2.303$ และ $\log q_e$ เป็นจุดตัดแกน y

2.6.7.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction)

ปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second Order) หมายถึง ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิดโดยแต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง

1) กรณีที่สารตั้งต้นมีชนิดเดียว



$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.12)$$

2) กรณีที่สารตั้งต้นมีสองชนิด



$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = \frac{-d[A]}{dt} = k[A][B] \quad (2.13)$$

เนื่องจากเลขชี้กำลังของ A เท่ากับหนึ่งและเลขชี้กำลังของ B ก็เท่ากับหนึ่ง รวมกันเป็นสอง จึงนับเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.14)$$

$$\text{หรือ} \quad -\frac{d[A]}{[A]^2} = kdt \quad (2.15)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการดังกล่าวจากที่เวลาเริ่มต้น (t_0) และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $[A_0]$ จนถึงเวลาใดๆ จะได้ว่า

$$\int_{[A_0]}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]^2} = k \int_0^t dt \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{[A]} = kt + \frac{1}{[A_0]} \quad (2.17)$$

ฉะนั้นจะได้ว่า ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) คือ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.18)$$

โดย k_2 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (g/mg*min)

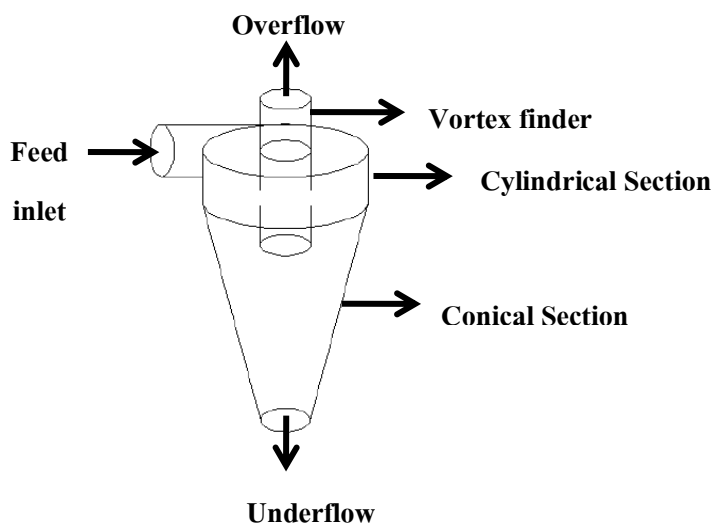
เมื่อนำสมการที่ 2.18 มาเขียนกราฟระหว่าง t/q_c กับ t จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน q_c และ $1/(k_2 q_c^2)$ เป็นจุดตัดแกน y

2.7 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ในการแยกของผสมออกจากกัน เช่น แยกของแข็งออกจากของเหลว ของเหลวออกจากของเหลว และของแข็งออกจากของแข็ง ไฮโดรไซโคลนและเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) มีหลักการเดียวกันคือการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของผสมสองชนิดที่ผสมกันอยู่ และ/หรือ รูปร่างและขนาดของอนุภาค แต่อย่างไรก็ตามในการทำงานของไฮโดรไซโคลนจะไม่มีชิ้นส่วนใดๆเคลื่อนที่ ซึ่งต่างจากเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) (วรศิริ เสียงสนัน, 2552)

2.7.1 ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน (วรศิริ เสียงสนัน, 2552)

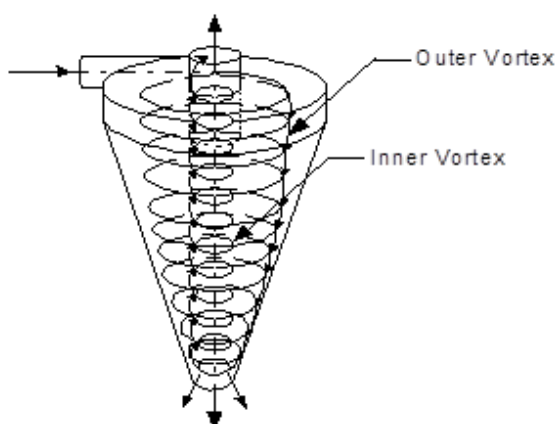
- 1) ส่วนทรงกระบอก (Cylindrical section)
- 2) ส่วนของกรวย (Conical section)
- 3) ช่องทางเข้าของของผสม (Feed inlet) จะอยู่ทางด้านข้างของไฮโดรไซโคลน เพื่อให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง เกิดการกระจายตัวของอนุภาค ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกตัวออกมาใกล้ผนังของไฮโดรไซโคลนและออกมาที่ช่องทางออกด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน ในทางปฏิบัติช่องจ่ายของไหลเข้าจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลของของผสมที่เข้ามาภายในไฮโดรไซโคลน
- 4) ช่องทางออกด้านบน (Overflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็ก และ/หรือมีความหนาแน่นต่ำ
- 5) ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ และ/หรือมีความหนาแน่นสูง
- 6) ท่อทะลุสำหรับให้ของไหลออกทางทางออกด้านบน (Vortex finder)



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน
(วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

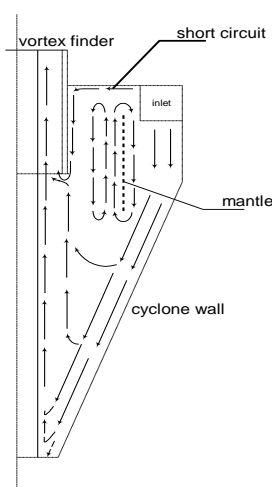
2.7.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน (Fluid Flow and Particle Motion in Hydrocyclone) (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

ของผสมจะถูกจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนจะมีลักษณะสมมาตร ดังแสดงในภาพ 2.9 ของผสมที่เข้ามาจะเคลื่อนที่ในลักษณะการไหลแบบเกลียววงนอก (Outer vortex) ไปสู่ด้านล่างของกรวย หลังจากนั้นของไหลและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะไหลออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) จากนั้นน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กจะไหลกลับขึ้นมาในแนวแกนกลางของไฮโดรไซโคลน (Inner vortex) เคลื่อนที่ในแนวโค้งขึ้นมาและไหลออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) ผ่านทาง Vortex finder



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไฮโดรไซโคลน
(วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

นอกจากนี้ด้านบนของไฮโดรไซโคลนจะพบการไหลอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าการไหลลัดวงจร (Short circuit flow) โดยของผสมจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนปิดบน Vortex finder และรอบๆผนังของไฮโดรไซโคลน โดยที่ของผสมนั้นจะไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณในส่วนบนของไฮโดรไซโคลนและไหลออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) โดยไม่ผ่านการหมุนวนแบบเกลียววงนอก (Outer vortex) และการหมุนวนแบบเกลียววงใน (Inner vortex) ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นการไหลนี้ และยังทำให้ความเร็วในการหมุนวนของไฮโดรไซโคลนลดลง อีกทั้งยังมีการไหลวนที่เรียกว่า Mantle ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งทำให้เกิดการแบ่งระหว่างการไหลลงที่บริเวณผิวของกรวย และการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณด้านในใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

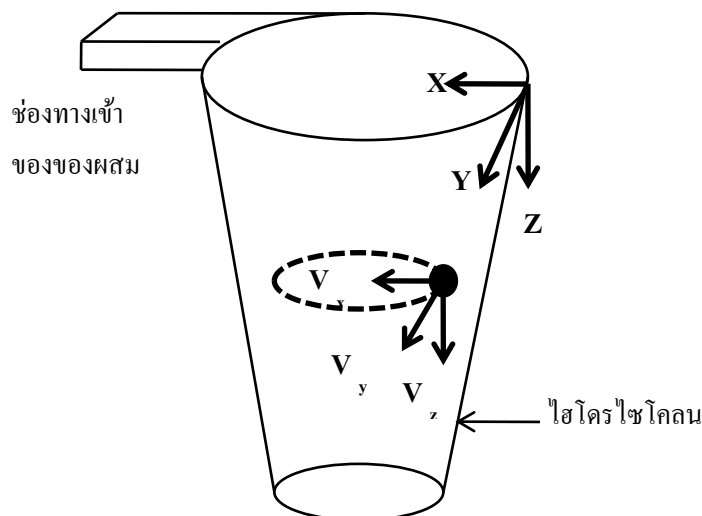


ภาพที่ 2.10 ภาพการไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน
(วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

2.7.3 ความเร็วของการไหลในไฮโดรไซโคลน (Velocity in hydrocyclone)

(ชัยยุทธน์ สวัสดิวงษ์, 2553)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, V_z) และ ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, V_x) ของไฮโดรไซโคลน



ภาพที่ 2.11 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไฮโคลน
(ชัยุทธณ์ สวัสดิวงษ์, 2553)

2.7.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity, V_y)

ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของผสมที่จ่ายเข้าไปที่บริเวณทางเข้าของไฮโดรไฮโคลน มีทิศทางสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไฮโคลน สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้าของของผสมที่จ่ายเข้าที่บริเวณทางเข้าและพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไฮโคลน ได้ดังสมการ

$$V_i = \frac{Q}{A_i} \quad (2.19)$$

โดย V_i คือ ความเร็วน้ำที่ออกจากท่อ ณ จุดจ่ายน้ำเข้า
 Q คือ อัตราการไหลเข้าของของผสมที่ไหลเข้าไฮโดรไฮโคลน
 A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไฮโคลน

โดยที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ในไฮโดรไฮโคลนแสดงได้ ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \alpha = \frac{V_y}{V_i} \quad (2.20)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_y = \alpha \frac{Q}{A_i} \quad (2.21)$$

เมื่อ α คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วภายในไฮโดรไซโคลน (V_y) กับความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า (V_p) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.8 (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

จากสมการที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราการไหล (Q) คงที่ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะลดลง เมื่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น

จาก Helmholtz's law แสดงถึงการหมุนวนของไหลในอุดมคติ โดยอาศัยหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) โดยไม่พิจารณาแรงต้านทาน จะได้ว่า

$$V_y R = \text{constant} \quad (2.22)$$

เมื่อ V_y คือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่รัศมีการหมุนใดๆ
 R คือ รัศมีการหมุนใดๆ

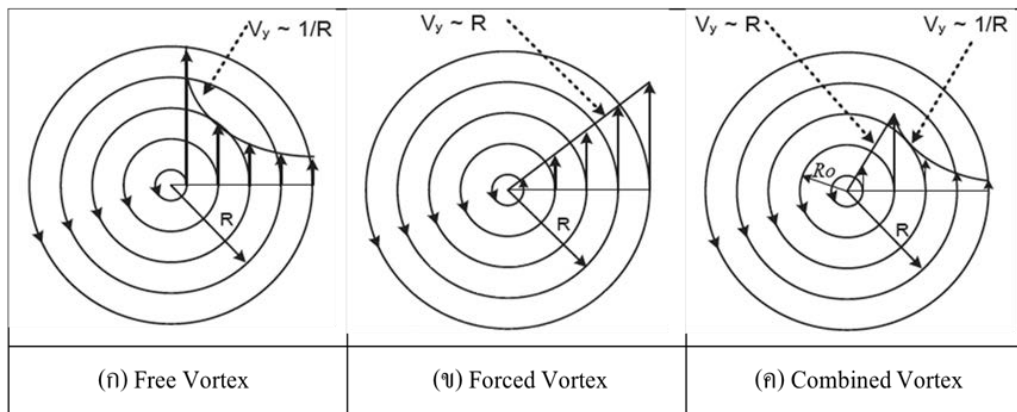
แต่ในทางปฏิบัติจริง จะมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) จะทำให้ได้ค่าน้อยกว่าสมการข้างต้น ดังนั้น

$$V_y R^n = \text{Constant} \quad (2.23)$$

โดยที่ n มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.9 และเมื่อคิดว่าไม่มีแรงเสียดทานการไหล ค่า n จะมีค่าเท่ากับ 1 (Svarovsky, 1984 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

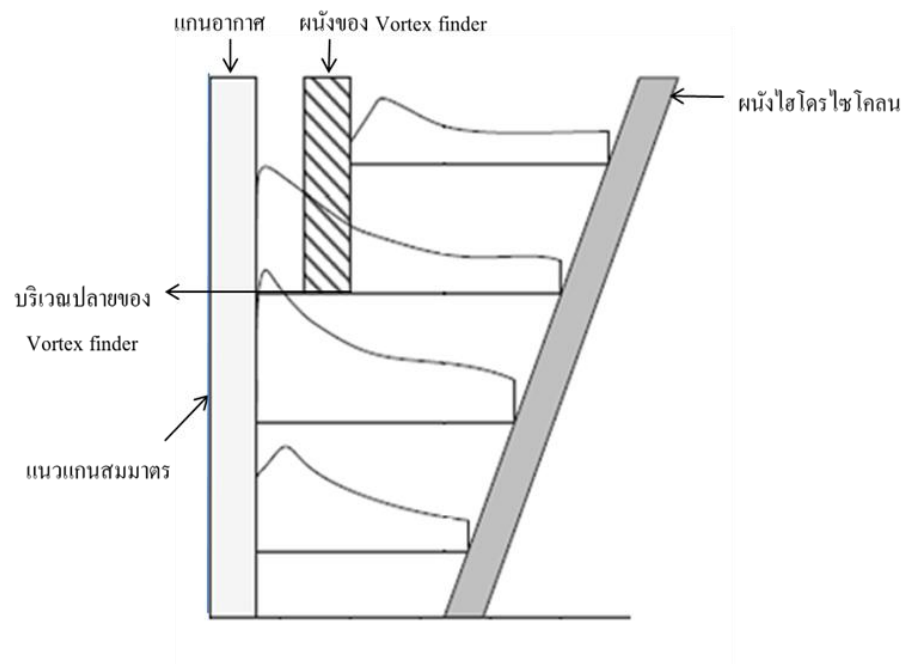
เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.22 และ 2.23 จะเห็นว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะลดลง โดยสมการดังกล่าวใช้ได้กับการหมุนวนภายนอก (Outer vortex) แต่เมื่อพิจารณาการหมุนวนภายใน (Inner vortex) ในทิศทางขึ้นใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน จะเห็นได้ว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลงความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงก็จะลดลงด้วย ดังสมการ

$$\frac{V_y}{R} = \text{constant} \quad (2.24)$$



ภาพที่ 2.12 ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท
(ชัยุทธม์ สวัสดิวิทย์, 2553)

จากภาพที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่า สภาพจริงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลอน คือการหมุนวนแบบ (ค) Combined vortex โดยเมื่ออนุภาคอยู่ในบริเวณใกล้กับตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมากที่สุด ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจะดีที่สุด ดังนั้นจึงควรออกแบบไฮโดรไซโคลอนที่ยาวและมีมุมกรวยแหลม เพื่อเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเข้าสู่ตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมากขึ้น



ภาพที่ 2.13 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y)
ภายในไฮโดรไซโคลอน (Heiskanen, 1993)

จากภาพที่ 2.13 จะสังเกตได้ว่า

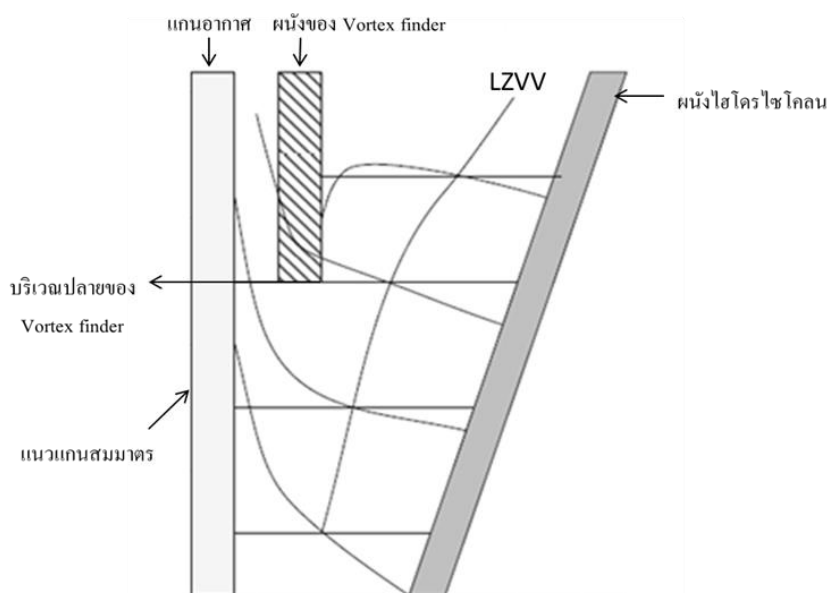
- เมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านล่างใต้ปลายของ Vortex finder ลงมา จะพบว่าเมื่อรัศมีของไฮโดรไซโคลนลดลงความเร็วตามแนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2.22 และ 2.23

- เมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านบนเหนือปลายของ Vortex finder ขึ้นไป จะพบว่าไม่สามารถใช้สมการดังกล่าวข้างต้นอธิบายได้ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้ผนังของไฮโดรไซโคลนความเร็วตามแนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของไฮโดรไซโคลนลดลง แต่เมื่อถึงใกล้ผนังของ Vortex finder ความเร็วตามแนวสัมผัสจะลดลงอย่างรวดเร็ว

- ตำแหน่งในแนวตั้งไม่ส่งผลต่อความเร็วตามแนวสัมผัส

2.7.3.2 ความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity, V_z)

ความเร็วตามแนวแกน คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลน โดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง นั่นคือ การหมุนวนภายนอก (Outer vortex) ที่มีทิศทางลงสู่ทางออกด้านล่าง ในขณะที่การหมุนวนภายใน (Inner vortex) ที่มีทิศทางขึ้นไปสู่ทางออกด้านบน จากทิศทางการไหลในส่วนการหมุนวนภายนอกและการหมุนวนภายในที่มีทิศทางสวนทางกัน จะทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ (Locus zero vertical velocity, LZVV) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัส (Tangential velocity) มีค่าสูงสุด



ภาพที่ 2.14 การกระจายความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity, V_z)

ภายในไฮโดรไซโคลน (Heiskanen, 1993)

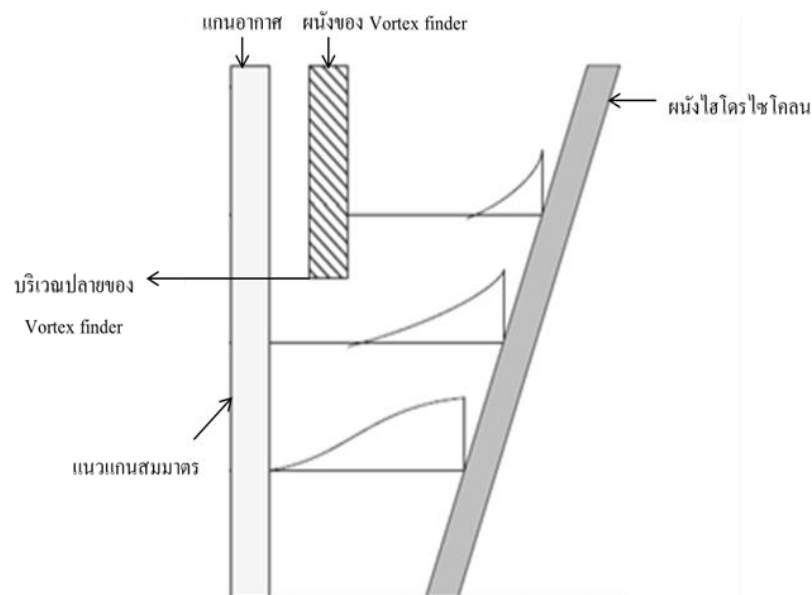
จากภาพที่ 2.14

- เมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านล่างได้ปลายของ Vortex finder ลงมา จะพบว่าจากผนังของแกนอากาศ จนถึง LZVV การไหลของของเหลวจะไหลขึ้นข้างบนและออกสู่ทางออกด้านบน (Overflow) ส่วนของเหลวที่เหลือ ตั้งแต่บริเวณ LZVV ถึงผนังของกรวยจะไหลลงมา และออกสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow)

- เมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านบนเหนือปลายของ Vortex finder ขึ้นไป จะพบว่าที่บริเวณใกล้ๆกับผนังไฮโดรไซโคลนของเหลวจะมีความเร็วตามแนวแกนสูงสุดและมีทิศไหลลง เมื่อรัศมีของไฮโดรไซโคลนลดลงความเร็วตามแนวแกนจะลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์หลังจากนั้นของเหลวจะเริ่มไหลขึ้นจนมีความเร็วตามแนวแกนสูงสุดและลดลงจนเป็นศูนย์อีกครั้ง แล้วของเหลวจะไหลลงจนมีความเร็วแนวแกนที่มีค่าค่อนข้างมากที่บริเวณใกล้ๆผนังด้านนอกของ vortex finder

2.7.3.3 ความเร็วในแนวรัศมี (Radial Velocity, V_x)

ความเร็วตามแนวรัศมี คือ ความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลนและเป็นความเร็วที่มีค่าน้อยที่สุดจากความเร็วทั้ง 3 ชนิดของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน



ภาพที่ 2.15 การกระจายความเร็วในแนวรัศมี (Radial Velocity, V_x) ภายในไฮโดรไซโคลน

(Heiskanen, 1993)

จากภาพที่ 2.15 เมื่อรัศมีลดลงขนาดของความเร็วตามแนวรัศมีจะลดลง โดยที่บริเวณเหนือขอบของ Vortex finder ใกล้กับผนังของไฮโดรไซโคลนความเร็วในแนวแกนรัศมีจะมีค่ามากที่สุด

2.7.4 ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน

(Svarovsky, 1984 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

อนุภาคของสารแขวนลอยจะสามารถแยกออกจากสารผสมได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆ 2 ปัจจัย คือ สมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของอนุภาคและของไหล (Physico-Chemical parameter) และรูปร่างทางเรขาคณิตของไฮโดรไซโคลน (Geometric parameter)

2.7.4.1 สมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของอนุภาคและของไหล

(Physico-chemical parameter)

1) ความแตกต่างความหนาแน่นของทั้งสองเฟส เมื่อไม่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเฟสของแข็งและของเหลว ความเร็วในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะเป็นศูนย์ซึ่งแสดงว่าไม่สามารถทำการแยกเฟสทั้งสองออกจากกันได้

2) ความหนืดของของไหล ความเร็วในการแยกอนุภาคจะต่ำเมื่อค่าความหนืดของของไหลสูง ในทางตรงกันข้ามความเร็วในการแยกอนุภาคจะสูงเมื่อค่าความหนืดของของไหลต่ำ นอกจากนี้อุณหภูมิยังส่งผลต่อความหนืดของของไหลอีกด้วย โดยเมื่ออุณหภูมิสูงความหนืดของของไหลจะต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ค่าความเร็วในการแยกอนุภาคสูงควรให้ของไหลมีความหนืดต่ำและอุณหภูมิสูง

3) ขนาดของอนุภาคของแข็ง เมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลงความเร็วในการตกตะกอนก็จะน้อยลงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนน้อยลงไปด้วย

ความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว ความหนืดของของเหลว และขนาดของอนุภาค เป็นลักษณะเฉพาะตัวของอนุภาคและของเหลวนั้นๆ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ชนิดและขนาดของอนุภาค และชนิดของของเหลว มีผลต่อประสิทธิภาพในแยกด้วยไฮโดรไซโคลน

2.7.4.2 รูปร่างทางเรขาคณิตของไฮโดรไซโคลน (Geometric parameter)

1) เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน วัดที่ฐานของส่วนที่เป็นกรวยหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ในแง่ของขนาดตัด (Cut size) โดยให้อัตราการไหลคงที่ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) และความดันลด (ΔP) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน (D_c) เป็นดังนี้

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2.25)$$

$$\Delta P \propto D_c^y \quad (2.26)$$

โดยที่ x มีค่าอยู่ในช่วง 1.36-1.52 และ y มีค่าอยู่ในช่วง -3.6 ถึง -4.1 จะเห็นว่า ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนเล็กๆ จะทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่แยกออกมาได้เล็กตามไปด้วย และเมื่อไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ขึ้นค่าความดันลดจะมากขึ้นเช่นกัน

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.25 และ 2.26 นั้น เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลคงที่ ตามปกติแล้วสามารถใช้ไฮโดรไซโคลนหลายๆตัวต่อกันโดยที่ให้อัตราการไหลเท่ากัน ภายใต้สภาวะที่ความดันลดคงที่ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด (Pressure drop) คงที่เป็นดังนี้

$$Q \propto D_c^z \quad (2.27)$$

โดยที่ z มีค่าอยู่ในช่วง 1.8 ถึง 2.0 และความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) กับเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนที่ความดันลดคงที่ เป็นดังนี้

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2.28)$$

โดยที่ x มีค่าอยู่ในช่วง 0.41 ถึง 0.5

แสดงให้เห็นว่า เมื่อลดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนลง ขนาด d_{50} ลดลงเช่นกัน หมายถึงไฮโดรไซโคลนสามารถคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กลงไปได้อีก

2) ขนาดของช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลน (Area of Inlet: D_i)

หากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลนมีขนาดที่เหมาะสมจะส่งผลให้ของผสมมีการกระจายตัวและไหลวนดีขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งกับของเหลวติดตามมาด้วย โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (D_i) ที่เหมาะสมควรจะทำให้อัตราโมเมนต์ (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากจะทำให้ความเร็วเฉลี่ยที่ช่องทางเข้าเท่ากับความเร็วสัมผัส (Tangential velocity) ที่รัศมีเฉลี่ยของทางเข้า (Mean radius of entry) การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางจ่ายเข้าจะทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงจะลดลง ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจะเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับไฮโดรไซโคลนนั้นๆ (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้า (D_i) ที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับและใช้กันทั่วไปแสดงโดย Chaston คือ $D_c/6$ ถึง $D_c/7$ โดยที่ D_c คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

3) ขนาดของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder Diameter: D_o)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้า (D_i) เนื่องจาก 1) การไหลลัดวงจร (Short-circuit flow) เป็นการไหลผ่านช่วงบนของไฮโดรไซโคลนและไหลลงที่ผนังด้านนอกของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) 2) ผลกระทบที่ตำแหน่งเส้นความเร็วเป็นศูนย์ (Locus of zero vertical velocity)

การไหลลัดวงจร คือลักษณะการไหลที่นำอนุภาคหยาบไหลออกทางทางออกด้านบน (Overflow) เกิดจากผลการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องด้านบนมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วสัมผัส (Tangential velocity) สูงสุด อนุภาคที่อยู่ในเส้นการไหลลัดวงจร จะไหลกลับเข้ามาในบริเวณของการเพิ่มความเร็วสัมผัสภายในไฮโดรไซโคลน และเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้เกิดการไหลไปตามขอบด้านล่างของ Vortex finder ซึ่งจะทำให้อนุภาคมีโอกาสที่จะเข้ามาเพื่อแยกออกจากของไหลในไฮโดรไซโคลนได้อีก ในทางตรงกันข้ามถ้ารัศมีด้านนอกของ Vortex finder หรือช่องทางออกด้านบนมีขนาดเล็กกว่าตำแหน่งที่ความเร็วสัมผัสสูงสุด โอกาสที่อนุภาคจะถูกหมุนเหวี่ยงแยกในไฮโดรไซโคลนก็น้อยลงไปด้วย ดังนั้นหากเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Overflow หรือ Vortex finder) ลดลง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลงด้วย

ในกรณีขนาดของช่องทางออกด้านบน (D_o) ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZVV (Locus of Zero Vertical Velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วภายในไฮโดรไซโคลนเป็นศูนย์

โดยมีขนาดประมาณ 4.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน ($4.3D_c$) เป็นเหตุให้ลักษณะการไหลที่ควรเป็นตามปกติลดลงในการไหลตามแนวรัศมี ทำให้อนุภาคไหลแยกออกไปทางด้านบนโดยไม่ผ่านลงมาที่ตัวไซโคลนเกิดเป็นการไหลลัดวงจร

Bradley (1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) แนะนำว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุด สามารถพิจารณาจากลักษณะการไหล โดยค่ามากที่สุดเท่ากับ $D_c/2.3$ ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ $D_c/8$ สำหรับค่าที่ทำให้มีปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ออกที่ช่องทางด้านบนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ $D_c/7$ และขนาดช่องทางออกด้านบน (D_o) ควรจะใหญ่กว่าช่องทางจ่ายเข้า (D_i) อาจอยู่ในช่วง $D_o = D_i$ ถึง $1.6D_i$ และเพื่อเป็นป้องกันการเซาะผนังไฮโดรไซโคลนจากการจ่ายของไหลเข้าไปนั้น ค่า $2D_i + D_o$ ควรน้อยกว่า D_c สำหรับความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามแสดงดังสมการที่ 2.29

$$2D_i + D_o = 0.4 - 0.6D_c \quad (2.29)$$

4) ขนาดของช่องทางออกด้านล่าง (Apex Diameter: D_u)

เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) โดยมากจะไม่กำหนดเป็นค่าตายตัว โดยสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งขนาดช่องทางออกด้านล่างจะใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลออกด้านล่าง ขนาดของช่องทางออกด้านล่างจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะสามารถปล่อยให้อนุภาคขนาดใหญ่ผ่านออกมาได้ แต่ขนาดช่องทางออกด้านล่างที่ใหญ่มากเกินไปจะส่งผลให้ความเข้มข้นของของผสมที่ไหลออกทางช่องทางด้านล่างมีค่าลดลงและยังทำให้มีน้ำส่วนเกินพาอนุภาคละเอียดที่ยังไม่ได้แยกไหลผ่านช่องทางออกด้านบนเพิ่มขึ้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (D_u) ปกติแล้วจะอยู่ในช่วง $D_c/10$ ถึง $D_c/5$ และควรมีค่า $D_u = D_o/3$ เมื่อ $D_o = D_c/5$ ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ซึ่งจะให้ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเข้า (Feed flowrate) กับอัตราการไหลออกที่ช่องทางด้านล่าง (Underflow flowrate) มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง (D_u) อาจถือได้ว่าไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนหรืออาจมีน้อย (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลงเล็กน้อยเมื่อ D_u ลดลง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความดันตกสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางต่างๆ ใหญ่ตามไปด้วย ส่วนไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาด D_u เมื่อ D_u มีค่าประมาณ $D_c/7$

5) ความยาวของส่วนที่ยื่นเข้ามาในไฮโดรไซโคลน (Vortex Finds Length: L)

ความยาวของ Vortex finder จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ในแง่ของขนาดตัด (d_{50}) โดยขนาดตัดของไฮโดรไซโคลนจะลดลงเมื่อความยาว Vortex finder ลดลง และจะต่ำที่สุดเมื่อไม่มี Vortex finder ภายใต้สภาวะนี้จะทำให้การแยกอนุภาคขนาดใหญ่เกิดขึ้นได้ไม่ดี กล่าวคืออนุภาคขนาดใหญ่จะไปออกที่ทางออกด้านบน (Overflow) โดยเส้นทางการไหลลัดวงจร อย่างไรก็ตามมีผลการทดลองที่ให้ผลตรงกันข้ามกับทฤษฎีดังกล่าวเบื้องต้น จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ (24 นิ้ว) ทำการแยกของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ด้วยความดันต่ำ จะพบว่าความยาว Vortex finder ไม่มีผลกระทบ โดยผลการทดลองดังกล่าวอาจเกิดจากการที่อนุภาคตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้อนุภาคไหลออกจากเส้นการไหลลัดวงจรมาเข้าสู่การไหลแบบปกติภายในไฮโดรไซโคลนได้

อนุภาคจะมีเวลาที่อยู่ในไฮโดรไซโคลนมากขึ้น เมื่อความยาวของ Vortex finder เพิ่มขึ้น การเพิ่มความยาวของ Vortex finder จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอนุภาคขนาดหยาบในทางตรงกันข้ามกลับลดประสิทธิภาพการแยกอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กซึ่งควรจะไปออกที่ทางออกด้านบน (Overflow) กับน้ำใส กลับย้อนมาออกที่ส่วนปลายของไฮโดรไซโคลน และการเพิ่มความยาว Vortex finder จะทำให้อนุภาคมีเวลาในการแยกภายในตัวไฮโดรไซโคลนน้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง

6) ลักษณะของช่องท่อจ่ายของผสมเข้าไฮโดรไซโคลน

ช่องท่อจ่ายเข้า (Feed inlet) ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนมากนัก สามารถมีรูปร่างได้หลายแบบและหลายตำแหน่ง โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไฮโดรไซโคลนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากันความยาวต่อความกว้างที่เหมาะสม คือ 2:1 (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริเสียงสนัน, 2552)

ตำแหน่งของท่อจ่ายเข้าควรจะได้ระดับกับแผ่นปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลนซึ่งมีที่จำกัด บริเวณที่มีปัญหาหรือเรียกว่า Dead space เป็นบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจร โดยปกติจะต้องเกิดการไหลลัดวงจรอยู่เสมอ แต่ไม่ควรมีมากเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราการไหลทั้งหมด

มุมของช่องท่อจ่ายเข้า ไม่มีความสำคัญกับไฮโดรไซโคลนที่มีมุมระหว่าง 0 ถึง 10 องศา จากแนวราบ แต่ส่งผลกับอัตราการจ่ายของผสมที่มีอนุภาคขนาดหยาบ ซึ่งส่งผลในเรื่องบริเวณที่เกิดการลัดวงจร (Dead space) ที่เกิดขึ้นเหนือช่องทางจ่ายภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้นการ

ทำมุมของการจ่ายเข้าเพื่อหลีกเลี่ยงการจ่ายของผสมไหลเข้าไปในเส้นการไหลลัดวงจร แต่สำหรับในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องสนใจมุมของทางจ่ายเข้าแต่อย่างใด

7) ความยาวของไฮโดรไซโคลน (Length of Hydrocyclone: H)

ความยาวของไฮโดรไซโคลนมีผลต่อการแยกอนุภาค กล่าวคือถ้าไฮโดรไซโคลนมีความยาวมากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลให้อนุภาคของแข็งไหลออกทางช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนด้วยปริมาณที่มากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพลดลง

Bradley (1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) กล่าวว่า สัดส่วนระหว่างส่วนทรงกระบอกกับส่วนกรวยไม่ควรมากเกินไป โดยแนะนำว่าความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลนที่เป็นไปได้ควรมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน $H/D_c = 5$ และมีมุมกรวยเล็กกว่า 30 องศา

8) ส่วนกรวย

- ความยาวของกรวย (H-h) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง $2/3D_c$ ถึง D_c
 - มุมของกรวย (Angle of core : θ) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกระหว่างขนาดของมุมกรวยไฮโดรไซโคลน 9 องศาและ 20 องศา ที่อัตราการไหลเดียวกัน พบว่าไฮโดรไซโคลน 20 องศา ให้ขนาดตัด (d_{50}) เล็กกว่า จากการสังเกตค่า d_{50} ที่เปลี่ยนไปและความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความดันลด พบว่าที่ค่าความดันลดที่กำหนดไว้ นั้นไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา จะให้ปริมาณอัตราการจ่ายเข้าสูงกว่าโดยมีประสิทธิภาพการแยกเท่ากัน ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนมุมในช่วง 9 องศา ถึง 20 องศาไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ที่ความดันลดเดียวกัน (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

Bradley (1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) แนะนำว่าส่วนกรวยนั้นควรจะสั้นเท่าที่เป็นไป แต่ก็ต้องคงไว้เพื่อสะดวกในการจ่ายของผสมเข้าไป เมื่อคำนึงถึงความยาวของตัวไฮโดรไซโคลน มุมกรวยที่ถือว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 15 องศา แต่ถ้าไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 และ 15 มิลลิเมตร) ควรจะมีมุมแหลมประมาณ 9 องศาถึง 10 องศา

กรณีที่ใช้กรวยมุมกว้างก็คือไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับการทำไส (Classifier) หรือทำความสะอาด มีสองสาเหตุที่ต้องใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยใหญ่ ประการแรกคือไฮโดรไซโคลนมุมกว้างมีแนวโน้มที่จะอุดตันที่ปลายกรวยน้อยกว่า ประการที่สองคือ ความดันลดที่ใช้กับไฮโดรไซโคลนมุมกว้างที่อัตราการไหลเดียวกัน จะให้ขนาดตัด (d_{50}) เล็กกว่าไฮโดร

ไซโคลนที่มีมุมแหลม และมีการทดลองในแง่การใช้ไฮโดรไซโคลนเล็กๆ โดยมีช่องทางจ่ายเข้าเป็นแบบสัมผัส (Tangential inlet) ปรากฏว่าใช้ในการคัด (Classification) ตามขนาดที่ต้องการได้ดี

เนื่องจากยังไม่มีผลสรุปที่แน่นอนของผลกระทบของขนาดมุมกรวยและความยาวของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยก ดังนั้นขนาดมุมกรวยและความยาวของไฮโดรไซโคลนจึงเป็นตัวแปรที่คำนึงถึงน้อยที่สุดในการออกแบบ อย่างไรก็ตามไฮโดรไซโคลนที่มีส่วนที่เป็นทรงกระบอกยาว และมีมุมกรวย 20 องศา และมีส่วนกรวยยาวเท่ากับไฮโดรไซโคลน 9 องศา ไม่ได้ส่งผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากงานวิจัยสนับสนุนว่า มุมกรวยที่แหลมจะให้ความจุสูงและเพิ่มประสิทธิภาพ

สรุปผลของรูปร่างทางเรขาคณิตที่มีต่อไฮโดรไซโคลน (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

1) เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนส่งผลต่อประสิทธิภาพกับอัตราการจ่ายที่สามารถทำการแยกในไฮโดรไซโคลน ขนาดตัดของอนุภาคจะมีขนาดเล็กเมื่อใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก

2) การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (Overflow) ความดันลด (Pressure drop) เพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ขนาดตัดเล็กลง ซึ่งขนาดของช่องทางจ่ายเข้าที่เหมาะสมโดยที่ขนาดตัดและความดันลดน้อยที่สุด คือ $D_i = D_c/3.5$ และ $D_o = D_c/3$

3) การเพิ่มความยาวของท่อขึ้นสำหรับช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคขนาดหยาบเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กจะลดลง โดยความยาวที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของไฮโดรไซโคลน อย่างไรก็ตาม ควรจะมีช่วงอยู่ระหว่าง $D_c/2.5$ ถึง $D_c/3$

4) เมื่อไม่คำนึงถึงสัดส่วนระหว่างความยาวของส่วนกรวยและทรงกระบอกไฮโดรไซโคลนที่ยาวจะทำให้อัตราการจ่ายผ่านไฮโดรไซโคลนสูง นอกจากนี้มุมของส่วนกรวยไม่ควรจะมีขนาดใหญ่เกินกว่า 20 องศา ยกเว้นในกรณีที่เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายกรวย

5) ช่องทางจ่ายเข้าที่เป็นสี่เหลี่ยมและมีด้านยาวขนานกับแกนของไฮโดรไซโคลน อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างที่เหมาะสม คือ 2:1

6) ช่องท่อจ่ายเข้าควรมีผนังเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลน

7) เมื่อมีของแข็งที่มีความสามารถในการคัดกรองอยู่ในของผสมที่จ่ายเข้า ควรจะทำการป้องกันการสึกกร่อนที่บริเวณฐานของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และส่วนปลายโดยการเคลือบหรือสวมปลายของกรวย

2.7.5 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอน (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

น้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยไฮโดรไซโคลอนจะยังมีอนุภาคของแข็งแขวนลอยปะปนอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ไฮโดรไซโคลอนไม่สามารถแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้อย่างสมบูรณ์

2.7.5.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency, Mass recovery, Retention)

ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) ของไฮโดรไซโคลอน คือสัดส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคของแข็งที่แยกออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) หารด้วยปริมาณอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่ช่องจ่ายเข้า (Inlet) โดยสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.30)$$

$$M = Q \cdot C \quad (2.31)$$

$$M_u = Q \cdot C_u \quad (2.32)$$

โดย	E_T	คือ ประสิทธิภาพรวม
	M	คือ มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน
	M_u	คือ มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังส่วนล่างของไฮโดรไซโคลอน
	Q	คือ อัตราการไหลที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน
	U	คือ อัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน
	C	คือ ความเข้มข้นของของผสมที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน
	C_u	คือ ความเข้มข้นของของผสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน

ในกรณีที่ความเข้มข้นของน้ำที่ช่องจ่ายเข้า (Inlet) เท่ากับความเข้มข้นของน้ำที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (Underflow) แสดงว่าไม่เกิดการแยกอนุภาคเกิดขึ้น ไฮโดรไซโคลอนจึงทำหน้าที่เพียงแบ่งการไหล (Flow split) เท่านั้น ซึ่งควรจะทำให้ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอนมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$C_U = C \quad (2.33)$$

จะได้ว่า
$$E_T = \frac{U \cdot C_U}{Q \cdot C} = \frac{U}{Q} \quad (2.34)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมไม่สามารถใช้แสดงประสิทธิภาพที่แท้จริงของไฮดรอลิกโคลนได้ เนื่องจากเมื่อทำการแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Underflow) ทารด้วยอัตราการจ่ายน้ำเข้า (Flowrate) จะพบว่ามีความมากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นจึงมีการนิยามประสิทธิภาพของไฮดรอลิกโคลนที่คำนึงถึงผลในการแบ่งอัตราการไหลด้วย เรียกว่า ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

2.7.5.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

คือ ประสิทธิภาพของไฮดรอลิกโคลนในการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน โดยคำนึงถึงผลในการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากจุดประสงค์ของการแยกภายในไฮดรอลิกโคลน คือต้องการให้ส่วนทางออกด้านล่างมีแต่ปริมาณของแข็งหรืออนุภาคทั้งหมด และมีเฉพาะน้ำใสในส่วนทางออกด้านบน แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ เพราะจะต้องมีส่วนของของเหลวออกมาที่ทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้น จึงต้องนำสัดส่วนของของเหลวมาคำนวณประสิทธิภาพด้วย

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2.35)$$

$$R_f = \frac{U}{Q} \quad (2.36)$$

โดย	E_T	คือ ประสิทธิภาพรวมของไฮดรอลิกโคลน
	E'_T	คือ ประสิทธิภาพลดของไฮดรอลิกโคลน
	R_f	คือ อัตราส่วนการแบ่งการไหล (Flow split)

ในกรณีนี้หากไม่มีการแยกอนุภาคเกิดขึ้น หรือ $c_u = c$ ซึ่งควรจะทำให้ประสิทธิภาพของไฮดรอลิกโคลนมีค่าเป็นศูนย์และสามารถแสดงได้ด้วยสมการของประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ดังนี้

จากสมการ 2.35 และ 2.36 จะได้

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} = 0 \quad (2.37)$$

ด้วยเหตุนี้ในทางปฏิบัติแล้ว ควรคำนวณประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนโดยใช้ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แทนการใช้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

2.7.6 การหาประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravitational Separation) และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Separation) โดยสมการทางคณิตศาสตร์ (Reynolds, 1996)

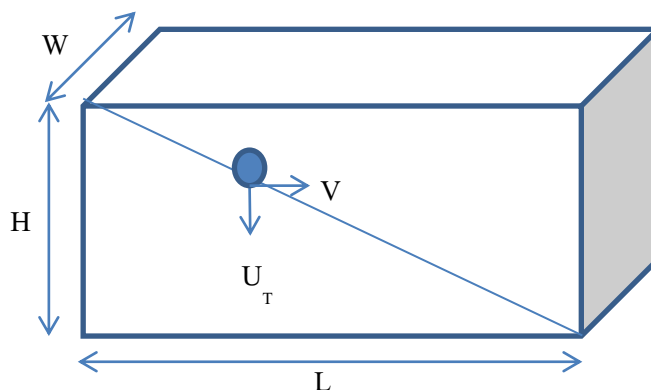
2.7.6.1 ห้องตกตะกอน (Sedimentation)

ในทางทฤษฎีความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity, U_T) ของอนุภาคในห้องตกตะกอน สามารถประมาณได้จากการคำนวณตามกฎของสโตค (Stoke's law equation) เมื่ออนุภาคชนิดหนึ่งเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา เช่น ถังตกตะกอน อนุภาคจะถูกแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำให้อนุภาคตกลง โดยขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ลงจะมีแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ เรียกว่าแรงลาก (Drag force) และแรงต้านจากความหนืดของของเหลว (Viscosity) (ชัยธรรม สวัสดิวงษ์, 2553)

สมการกฎของสโตค (Stoke's law equation) คือ

$$U_T = \frac{g(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu} \quad (2.38)$$

โดย	U_T	คือ ความเร็วสุดท้ายในการตกตะกอน (เมตรต่อวินาที)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที ²)
	$\Delta\rho$	คือ ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	D_p	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)
	μ	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 2.16 ถังตกตะกอนแบบอุดมคติ

เมื่อสมมติให้รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบต่อเนื่อง (Plug flow) ของอนุภาค โดยที่ทิศทางการไหลแนวอนมีค่าอัตราความเร็วเท่ากันทุกส่วนในชั้นที่มีการตกตะกอน ดังนั้นอนุภาคหนึ่งจะสามารถตกตะกอนภายในถังตกตะกอนได้จำเป็นต้องมีระยะเวลาพักน้ำ (Retention time, T_R) ที่มากกว่าหรือเท่ากับระยะเวลาในการตกตะกอน (Sedimentation time, T_S) ดังนั้นประสิทธิภาพในการตกตะกอนโดยรวมสามารถคำนวณอย่างคร่าวๆ ได้จากสัดส่วนระหว่างระยะเวลา T_R ต่อระยะเวลา T_S กล่าวคือ

$$\eta_{\text{sedimentation}} = \frac{T_R}{T_S} = \frac{L/V}{H/U_T} \quad (2.39)$$

โดย v คือ ความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าอุปกรณ์ (เมตรต่อวินาที)
 L คือ ความยาวของห้องตกตะกอน (เมตร)
 H คือ ความสูงของห้องตกตะกอน (เมตร)

แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพที่คำนวณได้ข้างต้นสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลแบบที่เกิดขึ้นเป็นแบบต่อเนื่อง (Plug flow) ของอนุภาคหนึ่งในถังตกตะกอน ($\eta_{\text{Block flow}}$) ทั้งนี้ ในกรณีที่เฟสของไหลในระบบมีการไหลผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Completely mixed flow) ประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่สัมพันธ์กันนั้น ($\eta_{\text{mixed flow}}$) จะได้จากการหาปริพันธ์ (Integrate) ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวของถังตกตะกอน โดยมีค่าเท่ากับ

$$\eta_{\text{mixed flow}} = 1 - \exp(-\eta_{\text{block flow}}) \quad (2.40)$$

$$\eta_{\text{mixed flow}} = 1 - \exp\left(-\frac{L \cdot g \cdot D_p \cdot (\rho_p - \rho)}{18 \cdot \mu \cdot H \cdot V}\right) \quad (2.41)$$

2.7.6.2 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

เนื่องจากไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่แยกอนุภาคโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังนั้น ความเร่งที่ทำให้อนุภาคแยกออกจากของไหลจะไม่ใช้ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก แต่จะเป็นความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลน (Centrifugal acceleration) ซึ่งส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค (U_T) เพิ่มขึ้น ซึ่งสมการการหาความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน คือ

$$U_T = \frac{a_c(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu} \quad (2.42)$$

$$a_c = \frac{2V_y^2}{D_c} \quad (2.43)$$

โดย a_c คือ ความเร่งหนีศูนย์กลางในไฮโดรไซโคลน (เมตรต่อวินาที²)
 V_y คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลน (เมตรต่อวินาที)

โดยตามทฤษฎีแล้วความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลน (V_y) บริเวณผนังทางเข้าของไฮโดรไซโคลน จะต้องเท่ากับความเร็วเข้าไฮโดรไซโคลน (V) แต่ในความเป็นจริงจะเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วน ทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัสน้อยกว่าความเร็วเข้า ซึ่งอัตราส่วนระหว่างความเร็วตามแนวสัมผัสและความเร็วเข้า แสดงดังสมการที่ 2.19

เช่นเดียวกับการตกตะกอนในห้องตกตะกอน สมมติให้รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบต่อเนื่อง (Plug flow) ของอนุภาคหนึ่ง ซึ่งจะสามารถแยกออกจากเฟสของไหลภายในอุปกรณ์ประเภทไฮโดรไซโคลนได้เมื่อมีระยะเวลาที่น้ำ (Retention time, T_R) ที่มากกว่าหรือ

เท่ากับระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่ผนังของอุปกรณ์หรือระยะเวลาในการตกตะกอนในกรณีของถังตกตะกอน (Sedimentation time, T_s)

ทั้งนี้ ในกรณีที่อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนภายในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนนั้น จะสามารถเขียนเทอมของความยาวในการเคลื่อนที่ (L) และความสูง (H) หรือระยะที่อนุภาคแยกออกจากระบบ ซึ่งกำหนดให้มีค่าโดยประมาณเท่ากับความกว้างของท่อทางเข้า (D_i) กล่าวคือ

$$L = N_e \times \pi \times D_c \quad (2.44)$$

$$N_e = \frac{1}{D_i} \times (L_1 + \frac{L_2}{2}) \quad (2.45)$$

ดังนั้น

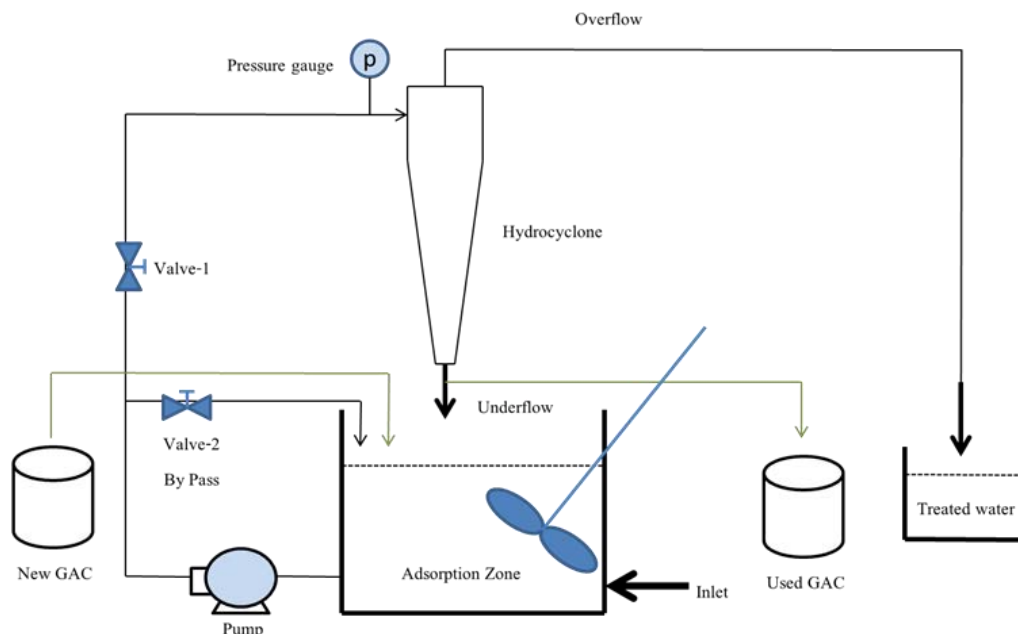
$$\eta_{\text{separation}} = \frac{T_R}{T_s} = \frac{(N_e \times \pi \times D_c)/V_y}{D_i/U_T} \quad (2.46)$$

โดย	N_e	คือ จำนวนรอบที่เฟสของไหล (น้ำ) หมุนวนในไฮโดรไซโคลอน
	L_1	คือ ความยาวของรูปทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลอน (เมตร)
	L_2	คือ ความยาวของส่วนกรวยของไฮโดรไซโคลอน (เมตร)
	D_c	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน (เมตร)
	D_i	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของไฮโดรไซโคลอน (เมตร)

และเนื่องจากไฮโดรไซโคลอนเป็นอุปกรณ์การแยกอนุภาคโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเฟสของไหลในระบบมีการไหลผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Completely mixed flow) จึงจำเป็นต้องพิจารณาประสิทธิภาพในการแยกในรูปของประสิทธิภาพแบบ Mixed flow ซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวจะเป็นไปตามสมการที่ 2.47

$$\eta_{\text{mixed flow}} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi \cdot N_e \cdot V_y \cdot D_p^2 \cdot (\rho_p - \rho)}{9 \cdot \mu \cdot D_i}\right) \quad (2.47)$$

2.8 แนวคิดของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2.17 แนวคิดเกี่ยวกับระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์

ระบบไฮบริดที่จะทำการศึกษาคือเป็นระบบผสมระหว่างกระบวนการ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดซับสีด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กรดฮิวมิกเป็นตัวแทนของสีที่ต้องการกำจัด และกระบวนการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากของไหลด้วยไฮโดรไซโคลน ดังนั้นสีจะถูกกำจัดโดยกระบวนการดูดซับ และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจะถูกแยกออกโดยไม่ไปก่อให้เกิดปัญหาที่ระบบกำจัดตะกอน

หลักการทำงานของระบบ คือ น้ำดิบจะถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบและมีการกำจัดสีผ่านกระบวนการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด โดยอาศัยการกวนผสมจากใบพัดและการเคลื่อนที่ของน้ำและถ่านกัมมันต์ภายในไฮโดรไซโคลน เพื่อให้เกิดการกวนผสมที่สมบูรณ์ หลังจากนั้นจะใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำดิบที่ผ่านการบำบัดแล้ว น้ำดิบที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกทางช่องทางออกด้านบน ส่วนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดจะออกทางช่องทางออกด้านล่างโดยส่วนหนึ่งจะถูกกำจัดออกและอีกส่วนหนึ่งจะวนกลับมาใช้ในกระบวนการดูดซับจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังภาพที่ 2.17

การติดตั้งระบบดังกล่าวสามารถติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ ของระบบผลิตน้ำประปา ดังต่อไปนี้ (1) ติดตั้งไว้บำบัดน้ำดิบก่อนเข้ากระบวนการผลิตน้ำประปา (2) ก่อนกระบวนการกรอง หรือ (3) ระหว่างกระบวนการกรองและกระบวนการฆ่าเชื้อโรค แต่ไม่ควรจะติดตั้งไว้หลัง

กระบวนการฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนจะถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ทำให้ไม่มีคลอรีนเหลือตกค้างในน้ำ (Chlorine Residual) โดยการติดตั้งไว้ก่อนกระบวนการกรอง หรือระหว่างกระบวนการกรองและกระบวนการฆ่าเชื้อโรคจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ภายในน้ำถูกกำจัดโดยกระบวนการผลิตน้ำประปาก่อนหน้า ซึ่งจะช่วยลดภาระของกระบวนการดูดซับในกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้กระบวนการดูดซับทำหน้าที่กำจัดสารละลายน้ำ เช่น กรดฮิวมิก ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การศึกษากระบวนการดูดซับ

Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005)

ศึกษาการใช้มีโซพอร์สถ่านกัมมันต์ (Mesoporous activated carbon) ซึ่งสังเคราะห์จากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous coal) 2 ชนิด ที่มีกรรมวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยถ่านหินบิทูมินัสชนิดแรกจะผ่านการเตรียมโดย นำถ่านหินบิทูมินัสแบบธรรมดาออกซิไดซ์ (Oxidize) ด้วยกรดไนตริก (Nitric acid) เพื่อสร้างกลุ่มไอออนแลกเปลี่ยน (Ion-exchange) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ หลังจากนั้นทำการเติมแคลเซียมกับเหล็ก โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนต์เซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ชนิดแรกไปผ่านการชะล้างโดยกรดไฮโดรคลอริกจะได้ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe_{dem} กรรมวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันทำให้ถ่านกัมมันต์ ทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันทั้งทางด้าน ปริมาตรของมีโซพอร์ (Mesopore volume) ขนาดการกระจายของมีโซพอร์ (Mesopore size distribution) และคุณสมบัติทางเคมีที่พื้นผิว (Chemical properties of surface) โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดจะถูกนำไปใช้ในการดูดซับกรดฮิวมิก ที่สกัดมาจากถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) 3 ชนิดที่มาจากคนละแหล่งกำเนิด เนื่องจากถ่านหินแต่ละชนิดประกอบด้วยกรดฮิวมิกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันไปตามระยะเวลาและแหล่งที่เกิดของถ่านหินนั้น ทำให้กรดฮิวมิกที่ถูกสกัดออกมามีโครงสร้างทางเคมี (Chemical structure) และปริมาณหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ที่แตกต่างกัน โดยกรดฮิวมิก 3 ชนิดที่นำมาใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยกรดฮิวมิกซึ่งสกัดมาจากถ่านหินลิกไนต์ในเมือง Sieniawa (S-HA) กรดฮิวมิกซึ่งสกัดมาจากถ่านหินลิกไนต์ในเมือง Lubstow (L-HA) โดยเหมืองถ่านหินทั้ง 2 แหล่ง ตั้งอยู่ในประเทศโปแลนด์ และกรดฮิวมิกที่สั่งซื้อจากบริษัท Aldrich (A-HA) ประเทศเยอรมันนี

ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด จะถูกนำไปทดสอบสมบัติการดูดซับกรดฮิวมิกทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีแบบทีละเท (Batch experiment) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของตัวถูกดูดซับ และพีเอช โดยปัจจัยทั้ง 3 จะถูกวิเคราะห์ผ่านการศึกษาคาร์บอนไอโซโทมและจลนศาสตร์การดูดซับ

การทดลองในแต่ละส่วนถูกออกแบบไว้ดังนี้

1. การศึกษาไอโซโทมการดูดซับ ทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 0.02 ถึง 0.2 กรัม และกรดฮิวมิกเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้บนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 วัน

2. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ ทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 0.05 กรัม กรดฮิวมิกเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พีเอช 5.4 ถึง 12.2

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของกรดฮิวมิกที่ใช้ในงานวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz

พารามิเตอร์ (% โดยน้ำหนัก)	S-HA	L-HA	A-HA
ค่าความชื้น (Moisture)	9.1	6.6	17.5
ปริมาณเถ้า (Ash)	16.7	1.0	28.4
คาร์บอน (Carbon)	58.8	67.2	75.6
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	3.7	5.0	4.6
ไนโตรเจน (Nitrogen)	5.9	4.3	5.2
ซัลเฟอร์ (Sulfur)	0.5	0.3	0.1
ออกซิเจน (Oxygen)	31.1	23.2	14.5

จากผลการทดลองพบว่า

1. แม้ถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดจะสกัดมาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นถ่านหินเหมือนกัน แต่กลับมีปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนที่แตกต่างกัน

2. กรดฮิวมิกที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีลักษณะเป็นสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) และมีความมีขี้้น้อย ในขณะที่กรดฮิวมิกที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก (Aromatic) มากกว่า และมีปริมาณกลุ่มทำปฏิกิริยาที่เป็นคาร์บอกซิลิก (Carboxylic groups) และฟีนอล (Phenolic groups) ปริมาณมาก

3. ชนิดของกรดฮิวมิกที่มีสารประกอบอะลิฟาติกมากที่สุด คือ A-HA รองลงมาคือ L-HA และ S-HA ตามลำดับ ดังนั้นขนาดโมเลกุลของกรดฮิวมิกเรียงจากใหญ่ไปเล็ก คือ A-HA, L-HA และ S-HA ตามลำดับ

4. เมื่อพิจารณาจากกราฟไอโซเทอมการดูดซับ พบว่า กรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดโดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดคือ S-HA รองลงมาคือ L-HA และ A-HA ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากรดฮิวมิกที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

5. สำหรับสารประกอบฮิวมิก (Humic substance) ขนาดของโมเลกุลจะแปรตามน้ำหนักโมเลกุล และเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกก็จะเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นด้วย แต่สำหรับกรดฮิวมิก (Humic acid) ขนาดของโมเลกุลไม่ขึ้นกับน้ำหนักของโมเลกุลเพราะมีผลกระทบของพีเอชที่จะทำให้รูปร่างของโมเลกุลกรดฮิวมิกเปลี่ยนไป

6. จากการสังเกตพบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอน (carbon content) ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพีเอชที่ใช้ในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 12.0 ถึง 12.5 ซึ่งจะสมมติว่าพีเอชไม่ส่งผลกระทบต่อรูปร่างของกรดฮิวมิก

7. ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe_{dem} มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่า SA/N/CaFe เมื่อนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดไปทดสอบหาปริมาณของรูพรุนขนาดต่างๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe_{dem} มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) 70% ของปริมาณรูพรุนทั้งหมด ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) เพียง 56% ของปริมาณรูพรุนทั้งหมด

8. ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe_{dem} ใช้เวลาในการเข้าถึงจุดสมดุลในการดูดซับ 70 ชั่วโมง ในขณะที่ SA/N/CaFe ใช้เวลาเป็น 2 เท่า

9. ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe_{dem} มีรูพรุนขนาด 10-50 นาโนเมตร ในปริมาณที่สูงกว่า SA/N/CaFe จำนวนมาก แสดงว่ารูพรุนขนาด 10-50 นาโนเมตร มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

10. จากการศึกษากลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งถูกนำมาทดสอบกับกรดฮิวมิก 3 ชนิด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R^2) ของปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo second order) มีค่าใกล้ 1 มากกว่า

11. ถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 12.2 ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิด SA/N/CaFe_{dem} มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.8 ดังนั้นพื้นผิวของ SA/N/CaFe มีประจุเป็นบวกทุกค่าพีเอช ในการทดลอง (พีเอชต่ำกว่า 12.2) ในขณะที่เมื่อพีเอชเท่ากับ 5.4 SA/N/CaFe_{dem} จะมีประจุบวก ส่วนที่พีเอช 10 และ 12.2 SA/N/CaFe_{dem} จะมีประจุลบ

12. เมื่อพีเอชมากขึ้นกรดฮิวมิกจะเป็นลบมากขึ้น

13. โดยปกติแล้วประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชต่ำๆ มีเพียงไม่กี่กรณีเท่านั้นที่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงในช่วงพีเอช 12-12.5 และประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเมื่อพีเอชต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพีเอชลดลง กรดฮิวมิกจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากเส้นตรง (Linear) เป็นทรงกลม (Coil structure) แต่บางครั้งกรดฮิวมิกที่มีทรงกลมก็รวมตัวใหญ่ขึ้น อันเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนบนพื้นผิว (Hydrogen bond) ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น โมเลกุลของกรดฮิวมิกที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

Imyim และ Prapalimrungsi (2010)

ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ทั้งแบบที่ผ่านเฉพาะการปรับสภาพ และแบบที่ผ่านการปรับสภาพและดัดแปลงพื้นผิวมาใช้สำหรับเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) กรดฮิวมิก (Humic acid) ในน้ำ รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) และสถานะที่เหมาะสมในการใช้งานตัวกลางดูดซับทั้ง 2 แบบ โดยเถ้าแกลบจะผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ส่วนการดัดแปลงพื้นผิวของเถ้าแกลบเตรียมได้โดยนำเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพแล้วไปผสมกับ 3-aminopropyltriethoxysilane หลังจากนั้นเถ้าแกลบทั้ง 2 ชนิดจะถูกนำไปศึกษาสมบัติในการดูดซับกรดฮิวมิกโดยการทดลองแบบทีละเท (Batch experiment) โดยตัวแปรที่ต้องการศึกษาได้แก่ระยะเวลาในการดูดซับ พีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย การทดลองจะถูกควบคุมไว้ที่อุณหภูมิ 298 ± 1 เคลวิน

การทดลองในแต่ละส่วนถูกออกแบบไว้ ดังนี้

1. การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับทำการทดลองโดยให้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 10-120 นาที ใช้กรดฮิวมิกเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และตัวดูดซับ 50 มิลลิกรัม
2. การศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับทำการทดลองโดยใช้กรดฮิวมิกเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และตัวดูดซับ 50 มิลลิกรัม ให้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 60 นาที ในช่วงพีเอช 3 ถึง 11
3. การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่อความสามารถในการดูดซับ ทำการทดลองโดยใช้กรดฮิวมิกเข้มข้น 10 ถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10

มิลลิลิตร และตัวดูดซับ 50 มิลลิกรัม และ พีเอชเท่ากับ 6 เนื่องจากกระบวนการบำบัดน้ำ (Water treatment) โดยทั่วไปจะควบคุมพีเอชไว้ที่ 5 ถึง 7

จากผลการทดลองพบว่าถ้ำแคลบทั้ง 2 ชนิด สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับในการดูดซับกรดฮิวมิกในน้ำได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดฮิวมิกของถ้ำแคลบแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของถ้ำแคลบที่ผ่านเฉพาะการปรับสภาพ คือ ควรให้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 60 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 3 จะสามารถลดปริมาณกรดฮิวมิกได้สูงสุด ไอโซเทอมการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอชเท่ากับ 6

2. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของถ้ำแคลบที่ผ่านการปรับสภาพและตัดแปลงพื้นผิว คือ ควรให้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 30 นาที ที่ช่วงพีเอช 3 ถึง 4 จะสามารถลดปริมาณกรดฮิวมิกได้สูงสุด ไอโซเทอมการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 8.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอชเท่ากับ 6

3. ถ้ำแคลบที่ผ่านการปรับสภาพและตัดแปลงพื้นผิวมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าถ้ำแคลบที่ผ่านเฉพาะการปรับสภาพ

4. ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น และค่อยๆ คงที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงถึงค่าหนึ่ง ในกรณีของถ้ำแคลบที่ผ่านเฉพาะการปรับสภาพ จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเท่ากับ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกรณีของถ้ำแคลบที่ผ่านการปรับสภาพและตัดแปลงพื้นผิว ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

Rauthula และ Srivastava (2011)

ทำการศึกษการดูดซับกรดฮิวมิก โดยถ้ำถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิดที่ทำมาจากกะลามะพร้าว โดยกรดฮิวมิกสั่งซื้อจากบริษัท S.D. Fine Chemicals ประเทศอินเดีย ส่วนถ้ำถ่านกัมมันต์สั่งซื้อจากบริษัท ZeoTech Adsorbent ประเทศอินเดีย โดยมีจุดประสงค์ในการทดลอง คือ ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกโดยการทดลองที่ละเทพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการสัมผัสรวมทั้งศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับระหว่างกรดฮิวมิกและถ้ำถ่านกัมมันต์

การทดลองในแต่ละส่วนถูกออกแบบไว้ดังนี้

1. พีเอช ทำการทดลองในช่วงพีเอช 2 ถึง 12 ใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับกรดฮิวมิกความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 24 ชั่วโมง อุณหภูมิในการดูดซับ 303 เคลวิน
2. ปริมาณตัวดูดซับ ทำการทดลองโดยปริมาณตัวกลางดูดซับ 0, 3, 5, 7, 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับกรดฮิวมิกความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 24 ชั่วโมง อุณหภูมิในการดูดซับ 303 เคลวิน
3. เวลาในการสัมผัส ทำการทดลองโดยใช้กรดฮิวมิกความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 0, 50, 125, 175, 300, 475, 725, 950, 1200 และ 1500 นาที

ผลการทดลองพบว่า

1. ปัจจัยของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ
 - 1.1 เมื่อพีเอชลดลงประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงขึ้น
 - 1.2 ตัวดูดซับมีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 8.5 อธิบายว่า เมื่อพีเอช (pH) ของสารละลายกรดฮิวมิกมีค่าต่ำกว่าพีเอชของประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ ($pH < pH_{pzc}$) แสดงว่าประจุที่ผิวของตัวดูดซับจะมีค่าเป็นบวกในทางตรงกันข้าม เมื่อพีเอชของสารละลายกรดฮิวมิกสูงกว่าพีเอชของประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ ($pH > pH_{pzc}$) ประจุที่ผิวของตัวดูดซับจะมีค่าเป็นลบ
 - 1.3 ที่พีเอชประมาณ 2 โมเลกุลของกรดฮิวมิกและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีประจุตรงกันข้ามกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างกันส่งผลให้กรดฮิวมิกสามารถถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ได้มาก
 - 1.4 เมื่อพีเอชอยู่ระหว่าง 2 และ 3 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากกรดฮิวมิกมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะลดลง ประกอบกับเมื่อพีเอชมากขึ้นถ่านกัมมันต์จะมีประจุบวกลดลง ด้วยเหตุผลทางด้านขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นและแรงดึงดูดที่ลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง
 - 1.5 เมื่อพีเอชมากกว่า 8.5 ทั้งโมเลกุลของกรดฮิวมิกและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุ ส่งผลให้โมเลกุลของกรดฮิวมิกไม่สามารถเข้าใกล้พื้นผิวของตัวดูดซับได้ทำให้การดูดซับไม่สามารถเกิดขึ้น

2. ปัจจัยของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

2.1 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์น้อยกว่า 10 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์มากกว่าหรือเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร จะพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะค่อยๆเข้าสู่สมดุล ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร

3. ปัจจัยของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับ

3.1 ภายใน 1 ชั่วโมงแรกจะพบว่ากรดฮิวมิกถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆลดลง นั่นก็เพราะว่าในช่วงแรกกรดฮิวมิกเคลื่อนเข้าไปในรูพรุนอย่างรวดเร็ว เมื่อการดูดซับดำเนินต่อไปเรื่อยๆ กรดฮิวมิกต้องเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งรูที่ไกลกว่าเดิมทำให้แรงเสียดทานในการเคลื่อนที่มากขึ้น

3.2 เวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 5 ชั่วโมง เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 12 ชั่วโมง สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. จากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์และกรดฮิวมิกที่นำมาใช้ในการทดลองพบว่าสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองมากกว่า

Maghsoodloo และคณะ (2011)

ศึกษาการนำถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular activated carbon, GAC) ชนิดที่ทำมาจากปิทมินัส ทั้งแบบธรรมดา และแบบที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวโดยไคโตซาน (Chitosan) มาใช้สำหรับเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) กรดฮิวมิก (Humic acid) ในน้ำ ถ่านกัมมันต์และกรดฮิวมิกที่นำมาใช้ในการทดลองสั่งซื้อมาจากบริษัท Sigma-Aldrich โดยใช้ถ่านกัมมันต์รุ่น Filtrasorb 400 (F400) จากการทดสอบเพื่อหาค่าศักย์ซีต้า ซึ่งแสดงถึงประจุที่อยู่ล้อมรอบผิวของตัวดูดซับ พบว่าศักย์ซีต้าของ ถ่านกัมมันต์ที่ทำมาใช้ในการทดลองมีประจุเป็นศูนย์ (Zero Point of Charge, pH_{pzc}) ที่ pH 9.8 โดยจุดประสงค์ของการทดลองแบ่งออกได้เป็น 3 ประการ คือ การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) การศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ และ การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

การทดลองในแต่ละส่วนถูกออกแบบไว้ ดังนี้

1. การศึกษาไอโซเทอมและผลกระทบของพีเอช ทำการทดลองที่พีเอช 3 ค่า คือ พีเอช 4, 7 และ 10 โดยใช้กรดฮิวมิกเข้มข้น 10 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
2. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ ทำการทดลองโดยใช้กรดฮิวมิกเข้มข้น 10 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และพีเอชเท่ากับ 7

จากผลการทดลองพบว่า

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกสูงกว่าแบบธรรมดา ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากมีการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้น (Chemical-sorption) เช่น เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attraction force) ระหว่างหมู่เอมีน (Amine functional group) ในไคโตซานกับโมเลกุลของกรดฮิวมิก
2. เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R^2) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและเทมกิน
3. ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย
 - 3.1 ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 4
 - 3.2 อิทธิพลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับและไอออนของกรดฮิวมิกที่ละลายในน้ำ
 - เมื่อพีเอชมากขึ้นกรดฮิวมิกจะมีประจุลบมากขึ้น อันเนื่องจากการให้โปรตอน (Deprotonation) แก่สารละลาย โดยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญที่มีผลต่อการให้โปรตอนของกรดฮิวมิก คือ หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) และหมู่ฟีนอล (Phenolic group) โดยเมื่อพีเอชมากกว่า 4 หมู่คาร์บอกซิลิกจะเป็นตัวให้โปรตรอน และเมื่อพีเอชมากกว่า 8 หมู่ฟีนอลจะเป็นตัวให้โปรตรอน ดังนั้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นกรดฮิวมิกจะมีประจุลบมากขึ้น
 - หมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของไคโตซานเป็นบริเวณสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดซับขึ้น ประจุที่ผิวของไคโตซานมีศักย์เป็นบวกเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นกรด (พีเอชต่ำลง)
 - ดังนั้น ที่พีเอชต่ำประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่มากขึ้นของประจุบวกบนผิวของไคโตซานเรซินที่กระทำต่อไอออนลบของกรดฮิวมิก

3.3 อิทธิพลต่อรูปร่างของกรดชีวมิค

- เมื่อสารละลายมีสภาพเป็นกรด กรดชีวมิคจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Coil structure) และเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นเบส กรดชีวมิคจะมีรูปร่างโมเลกุลเป็นเส้นตรง (Linear structure) ซึ่ง โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง แต่อย่างไรก็ตามกรดชีวมิคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมจะเกิดการรวมตัวกัน อันเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนบนพื้นผิวทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น

4. จลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบธรรมดาสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo second order) เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R^2) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้ง 2 ค่ามีค่าเท่ากันคือ 0.95 ส่วนจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวโดยไคโตซาน สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.98

ตารางที่ 2.4 สรุปการทดลองกระบวนการดูดซับ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	วัตถุประสงค์การทดลอง	ตัวแปรอิสระ	วิธีดำเนินการทดลอง
Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005) (ที่อุณหภูมิ 25 °C)	1.ศึกษารูปไอโซเทอมของการดูดซับ	ตัวดูดซับ 0.02- 0.2 g (0.1-1 g/l)	ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 50 mg/l ปริมาตร 200 ml ทำการทดลองที่พีเอช 12 เวลาในการดูดซับนาน 7 วัน
	2. จลนศาสตร์การดูดซับที่พีเอชต่างๆ	พีเอช 5.4-12.2	ใช้กรดฮิวมิกเข้มข้น 50 mg/l ปริมาตร 100 ml และตัวดูดซับ 0.05 g (หรือ 0.5 g/l)
Imyim และ Prapalimrungsi (2010) (ที่อุณหภูมิ 25 °C)	1.เวลาต่อความสามารถในการดูดซับ	10-120 min	ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 50 mg/l ปริมาตร 10 ml และปริมาณตัวกลางดูดซับ 50 mg (5 g/l) ที่พีเอช 6
	2.พีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ	พีเอช 3-11	ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 50 mg/l ปริมาตร 10 ml และปริมาณตัวกลางดูดซับ 50 mg เวลาในการดูดซับนาน 60 min
	3.ความเข้มข้นเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับ	10-60 mg/l	โดยปริมาตร 10 ml และตัวดูดซับ 50 mg ที่พีเอช 6
Rauthula และ Srivastava (2011) (ที่อุณหภูมิ 30 °C)	1.ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ	3, 5, 7, 10, 20 และ 30 g/l	ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 100 mg/l ปริมาณ 100 ml เวลาในการดูดซับนาน 24 hr
	2.พีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ	2, 4, 6, 8, 10 และ 12	ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 100 mg/l ปริมาณ 100 ml เวลาในการดูดซับนาน 24 hr และ ปริมาณตัวดูดซับ 10 g/l

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	วัตถุประสงค์ การทดลอง	ตัวแปรอิสระ	วิธีดำเนินการทดลอง
	3. เวลาต่อความสามารถ การดูดซับ	0, 50, 125, 175, 300, 475, 725, 950, 1200 และ 1500 นาที	ความเข้มข้นเริ่มต้นกรด ฮิวมิก 50, 100, 250, 500 และ 1000 mg/l ปริมาณ สารละลาย 100 ml และ ปริมาณตัวดูดซับ 10 g/l
Maghsoodloo และ คณะ (2011) (ที่อุณหภูมิ 25 °C)	1. ศึกษาไอโซเทอม การดูดซับ	- ความเข้มข้น เริ่มต้นกรดฮิวมิก 10-100 mg/l - พีเอช 4, 7 และ 10	ปริมาตรสารละลาย 40 ml
	2. ศึกษาจลนศาสตร์ การดูดซับ	ความเข้มข้น เริ่มต้นกรดฮิวมิก 10-100 mg/l	ปริมาตรสารละลาย 500 ml ที่พีเอช 7

2.9.2 การออกแบบกระบวนการต่อเนื่องแบบตัวกลางเคลื่อนที่

Islam และคณะ (2009)

ศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำระบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและระบบถังปฏิกรณ์แบบท่อ (Plug flow reactor) มาใช้แทนถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed Adsorption) ที่นิยมใช้กันทั่วไป พร้อมทั้งออกแบบสมการเพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ในสถานะต่างๆ

ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งต้องอาศัยข้อมูลในการออกแบบจากการทดลองแบบทีละเท (Batch experiment) และการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test) ในขณะที่ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและถังปฏิกรณ์แบบท่อ อาศัยข้อมูลการทดลองแบบทีละเทในการออกแบบถังปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อสถานะในการควบคุมถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งต่างไปจากค่าที่ได้ออกแบบไว้จะไม่สามารถทำนายประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ได้

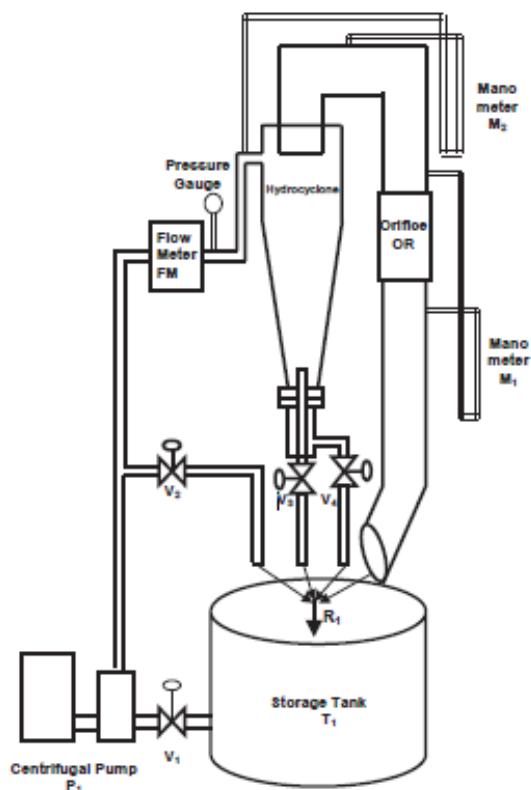
2.9.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไฮโดรไซโคลน

Dwari และคณะ (2004)

ศึกษาสภาวะต่างๆที่ส่งผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลนในแยกอนุภาคภายในของผสม 3 ชนิด โดยของผสมชนิดที่ 1 ประกอบด้วยทราย 2.5 กิโลกรัม และน้ำ 500 ลิตร ของผสมชนิดที่ 2 ประกอบด้วยทราย 1.25 กิโลกรัม เถ้าลอย 1.25 กิโลกรัม และน้ำ 500 ลิตร ส่วนของผสมชนิดที่ 3 ประกอบด้วยทราย 1.25 กิโลกรัม FCC (Fluid catalytic cracking) 1.25 กิโลกรัม และน้ำ 500 ลิตร โดยของผสมแต่ละชนิด จะถูกนำมาทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของ ขนาดอนุภาค ความดันจ่ายเข้า ความดันลด และความเร็วไหลเข้าของของเหลวต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน นอกจากนี้ยังพิจารณาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในแง่ของขนาดตัดของอนุภาค เนื่องจากขนาดตัดถูกใช้ เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงสมรรถนะในการทำงานของไฮโดรไซโคลน การที่ขนาดตัดของอนุภาคลดลง แสดงว่าสมรรถนะของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น โดยจะทำการเก็บตัวอย่างของน้ำตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค ที่ท่อทางเข้าไฮโดรไซโคลน และท่อทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน

การทดลองในแต่ละส่วนถูกออกแบบไว้ ดังนี้

1. ทุกการทดลองใช้ความเข้มข้นของอนุภาคต่อสารละลาย 500 ppm ไฮโดรไซโคลนขนาด 0.24 เมตร และพิจารณาขนาดอนุภาค ดังต่อไปนี้
 - ของผสมชนิดที่ 1 พิจารณาอนุภาคขนาด 89.9, 104, 121, 140, 162 และ 188 ไมโครเมตร
 - ของผสมชนิดที่ 2 พิจารณาอนุภาคขนาด 66.89, 77.5, 89.9, 104, 121, 140, 162 และ 188 ไมโครเมตร
 - ของผสมชนิดที่ 3 พิจารณาอนุภาคขนาด 89.9, 104, 121, 140, 162 และ 188 ไมโครเมตร
2. ปัจจัยอันเนื่องมาจากความดันจ่ายเข้า ทำการทดลองโดยใช้ ความดันจ่ายเข้า 27.6, 41.4, 55.2 และ 69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
3. ปัจจัยอันเนื่องมาจากความดันลด ทำการทดลองโดยใช้
 - ความดันลด 2.63, 4.27, 5.26 และ 6.58 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรกับของผสมชนิดที่ 1
 - ความดันลด 2.96, 3.95, 5.59 และ 6.90 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรกับของผสมชนิดที่ 2
 - ความดันลด 2.96, 3.95, 4.93 และ 8.55 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรกับของผสมชนิดที่ 3
4. ปัจจัยอันเนื่องมาจากความเร็วจ่ายเข้าของของไหล ทำการทดลองโดยใช้ ความเร็วจ่ายเข้าขนาด 3.56, 4.77, 6.0 และ 6.62 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 2.18 รูปแบบของถังปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยของ Dwari และคณะ

(Dwari และคณะ, 2004)

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของไฮโดรไซโคลนในงานวิจัยของ Dwari และคณะ

ส่วนประกอบ	ขนาด
1. ไฮโดรไซโคลน	
- เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน (m)	0.24
- ความยาวของส่วนทรงกระบอก (m)	0.3
- ความยาวของส่วนกรวย (m)	0.74
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าไฮโดรไซโคลน (m)	0.04
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน (m)	0.15
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างไฮโดรไซโคลน (m)	0.04
2. ถังเก็บน้ำ T ₁ (l)	1000

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการแยกจะเพิ่มขึ้น
2. เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกจะเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้นขนาดตัดจะลดลง

- การใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกของผสมชนิดที่ 1 พบว่า เมื่อความดันจ่ายเข้าเท่ากับ 27.6, 41.4, 55.2 และ 69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ขนาดตัดของอนุภาคจะมีขนาด 157, 91, 77.5, และ 71.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ และที่ความดันสูงสุด คือ 69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร อนุภาคขนาดมากกว่า 188 ไมโครเมตรสามารถแยกออกจากน้ำได้ 100%

- การใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกของผสมชนิดที่ 2 พบว่า เมื่อความดันจ่ายเข้าเท่ากับ 27.6, 41.4, 55.2 และ 69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ขนาดตัดของอนุภาคจะมีขนาด 141, 66, 60 และ 50 ไมโครเมตร ตามลำดับ และที่ความดันสูงสุด คือ 69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร อนุภาคขนาดมากกว่า 188 ไมโครเมตร สามารถแยกออกจากน้ำได้ 100%

- การใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกของผสมชนิดที่ 3 พบว่า เมื่อความดันจ่ายเข้าเท่ากับ 27.6, 41.4, 55.2 และ 69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ขนาดตัดของอนุภาคจะมีขนาด 198, 176, 138, และ 136 ไมโครเมตร ตามลำดับ

3. ปัจจัยของความดันลดต่อประสิทธิภาพในการแยกทุกอันมีแนวโน้มเหมือนกัน คือเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในการแยกของผสมชนิดที่ 3 เมื่อความดันลดสูงเกินกว่า 500 นิวตันต่อตารางเมตร ประสิทธิภาพในการแยกจะเท่าเดิม ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปัจจัยที่ขัดแย้งกัน 2 อย่างคือ เมื่อความดันลดเพิ่มขึ้นความเร็วจะเพิ่มขึ้น แต่มีการเกิดการไหลแบบหมุนวน (Eddy current) รอบช่องทางออกด้านบน (Vortex) ส่งผลให้เกิดการไหลลัดวงจร ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนลดลง

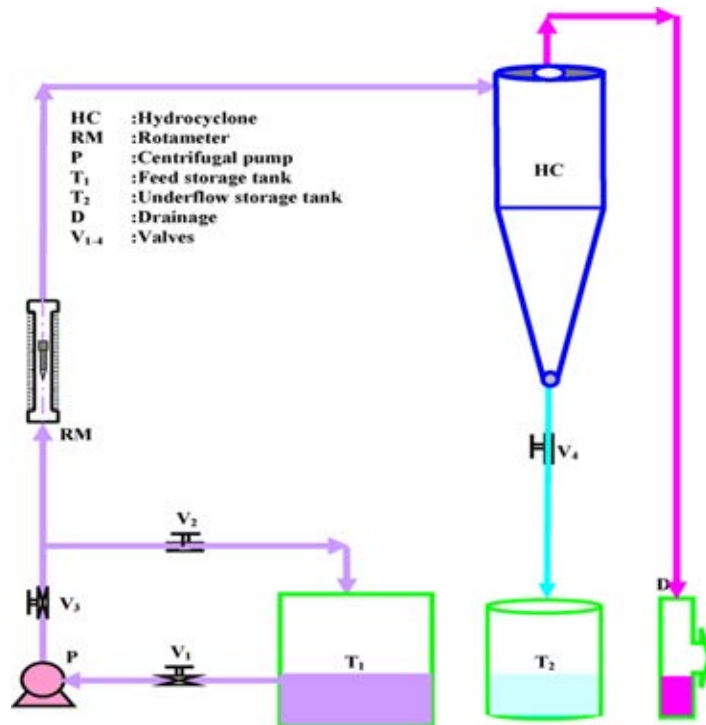
4. เมื่อความเร็วจ่ายเข้าของของไหลเพิ่มขึ้น ความดันลดของไฮโดรไซโคลนจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกเพิ่มขึ้น (ขนาดตัดของอนุภาคจะมีขนาดเล็กลง)

2.9.4 การศึกษากระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Rastogi และคณะ (2008)

ศึกษาการกำจัดเมทิลีนบลู (Methylene blue) ออกจากน้ำเสียโดยใช้เถ้าลอย (Fly ash) เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) และใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ในการแยกเถ้าลอยออกจากน้ำเสีย โดยการทดลองทั้งหมดทำที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และพีเอช 6.75 การเก็บตัวอย่าง

ปริมาณแก้้ลอย และความเข้มข้นของเมทิลลีนบลูในของเหลว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์จะเก็บที่ท่อทางเข้าไฮโดรไซโคลอน และท่อทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอน



ภาพที่ 2.19 รูปแบบของถังปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยของ Rastogi และคณะ
(Rastogi และคณะ, 2008)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของไฮโดรไซโคลอนและอุปกรณ์ในงานวิจัยของ Rastogi และคณะ

ส่วนประกอบ	ขนาด
1. ไฮโดรไซโคลอน	
- เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลอน (mm)	100
- ความยาวของส่วนทรงกระบอก (mm)	77
- ความยาวของส่วนกรวย (mm)	110
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าไฮโดรไซโคลอน (mm)	30
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลอน (mm)	50
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างไฮโดรไซโคลอน (mm)	15.6
2. ถังเก็บน้ำ T ₁ (l)	1000
3. ถังเก็บน้ำ T ₂ (l)	500

การทดลองมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ

1. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรโซโคลน

1.1 ขนาดอนุภาค โดยใช้เส้นลวยขนาด 74, 88, 105, 125, 149 และ 177 ไมโครเมตร

1.2 อัตราการไหลของของเหลว ทดลองที่อัตราการไหลของของเหลว 30, 35 และ 40 ลิตรต่อนาที

2. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ทำการทดลองที่อัตราการไหลของของเหลว 40 ลิตรต่อนาที

2.1 ปริมาณตัวดูดซับ (Adsorbent) ทดลองโดยใช้ตัวดูดซับ 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 ปริมาณตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ 65, 75 และ 85 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองสามารถสรุปได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเส้นลวยของไฮโดรโซโคลน ได้แก่ ขนาดของอนุภาคและอัตราการไหลของของเหลว โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคจะทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรโซโคลนเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรโซโคลนดีขึ้นและส่งผลให้ขนาดตัดของไฮโดรโซโคลนลดลง

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูของเส้นลวย ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับและปริมาณตัวถูกดูดซับ หากใช้ปริมาณตัวถูกดูดซับเท่าเดิมประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ในขณะที่หากใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่าเดิม ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเมื่อปริมาณตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

2.9.5 สรุปข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วงานวิจัยในปัจจุบัน มีวัตถุประสงค์ที่จะแยกมลสารเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งออกจากระบบ ในงานวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005); Imyim และ Prapalimrungsi (2010); Rauthula และ Srivastava (2011); Maghsoodloo และคณะ (2011) มีวัตถุประสงค์ที่จะแยกตัวถูกดูดซับออกจากของไหลโดยการใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ส่วนงานวิจัยของ Dwari และคณะ (2004) มีวัตถุประสงค์ที่จะแยกอนุภาคชนิดต่างๆออกจากของไหลด้วยไฮโดรโซโคลน ในบางครั้งความต้องการในการ

กำจัดมลสารชนิดหนึ่งอาจกลายเป็นการไปเติมมลสารอีกชนิดให้กับระบบ เช่น ในกรณีของกระบวนการดูดซับ ความต้องการในการกำจัดตัวถูกละลายออกจากของไหล ทำให้ต้องเติมตัวดูดซับเข้าไปในระบบ ระบบจึงเกิดมลสารชนิดใหม่ขึ้นซึ่งก็คือ ตัวดูดซับที่ถูกเติมเข้าไป แม้จะมีบางงานวิจัยที่มีการกำจัดมลสารมากกว่า 2 ชนิด เช่น งานวิจัยของ Rastogi และคณะ (2008) ที่มีการนำกระบวนการดูดซับและการกำจัดอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลอนมาทำงานร่วมกัน แต่ในงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ชัดเจนมากนักเกี่ยวกับการออกแบบระบบ รวมทั้งการนำตัวกลางดูดซับมาใช้ก็เป็นในลักษณะใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลอนในการแยกอนุภาค เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบระบบไฮบริดที่มีการวนตัวกลางดูดซับกลับมาใช้ในตัวกลางดูดซับหมดประสิทธิภาพ

โดยภายในงานวิจัยจะใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากของไหล และใช้ไฮโดรไซโคลอนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากของไหล การออกแบบระบบดูดซับจะออกแบบโดยใช้ระบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) เนื่องจากงานวิจัยของ Islam และคณะ (2009) ได้กล่าวไว้ว่า ระบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องสามารถทำนายประสิทธิภาพของระบบได้แม่นยำและง่าย นอกจากนี้ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์สามารถคำนวณคร่าวๆ ได้โดยสมการทางคณิตศาสตร์ ส่วนข้อมูลสำคัญที่จะใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ประเภทนี้คือ ไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ จากการศึกษาวิจัยของ Rastogi และคณะ (2008) ทำให้ตระหนักได้ว่าการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบและปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบควรที่จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการกำจัดสารถูกละลายออกจากของไหลโดยกระบวนการดูดซับ และส่วนการแยกตัวถูกละลายออกจากของไหลด้วยไฮโดรไซโคลอน โดยการพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับจะพิจารณาในรูปของจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ

จากการศึกษาวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005); Imyim และ Prapalimrungsi (2010); Rauthula และ Srivastava (2011); Maghsoodloo และคณะ (2011) ซึ่งเป็นงานวิจัยทางด้านการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ดูดซับกรดฮิวมิกทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ชนิดของตัวกลางดูดซับ ชนิดของตัวถูกละลาย ปริมาณตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย และพีเอช เมื่อชนิดของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนไปประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะเปลี่ยนไป โดยถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณของรูพรุนในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร (Mesopore) อยู่ในปริมาณที่สูงจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดกรดฮิวมิก เช่นเดียวกันเมื่อกรดฮิวมิกมีลักษณะเปลี่ยนไปความสามารถในการดูดซับก็จะเปลี่ยนไป โดยลักษณะทางโครงสร้าง

ของกรดฮิวมิกมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ แหล่งกำเนิด ระยะเวลา และสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ ชนิดแล้วปริมาณก็มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ หากพิจารณาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกเท่าเดิม เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากพิจารณาที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือเท่าเดิม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง โดยทั่วไปแล้วกราฟไอโซเทอมการดูดซับสามารถสร้างได้โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก และ/หรือปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ เนื่องจากค่าเหล่านี้จะทำให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (C_e) ซึ่งเป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการสร้างกราฟไอโซเทอมเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าในงานวิจัยต่างๆจะเลือกเปลี่ยนค่าเหล่านี้เพียงค่าใดค่าหนึ่ง โดยสิ่งที่นิยมคือ เปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก หรือปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกเปลี่ยนปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ เนื่องจากความสะดวกในการทำงานวิจัย โดยปกติแล้วประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ต่ำๆ มีเพียงไม่กี่กรณีเท่านั้นที่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง แต่เนื่องจากระบบไฮบริดที่จะทำการออกแบบมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้เป็นกระบวนการในการเพิ่มความสามารถของระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป โดยไม่ต้องการที่จะเปลี่ยนแปลงระบบการผลิตน้ำประปาตามปกติ ดังนั้นพีเอชที่จะเลือกใช้งานวิจัยควรเป็นช่วงพีเอชที่ใช้งานปกติในระบบผลิตน้ำประปา มั่นสิน ดัชนีทูลเวสม์ (2542) ได้กล่าวไว้ว่าสาร โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำประปามี 2 ชนิด คือ สารส้ม และสารประกอบเหล็ก เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ โดยสารส้มจะสร้างโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ได้ง่ายเมื่อน้ำมีพีเอชอยู่ในช่วง 6-7 ส่วนเกลือเฟอร์ริกคลอไรด์จะใช้ได้ผลดีเมื่อน้ำมีพีเอชในช่วง 5-7 ดังนั้นในการทดลองปัจจัยของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับจะทำการทดลองในช่วง พีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8

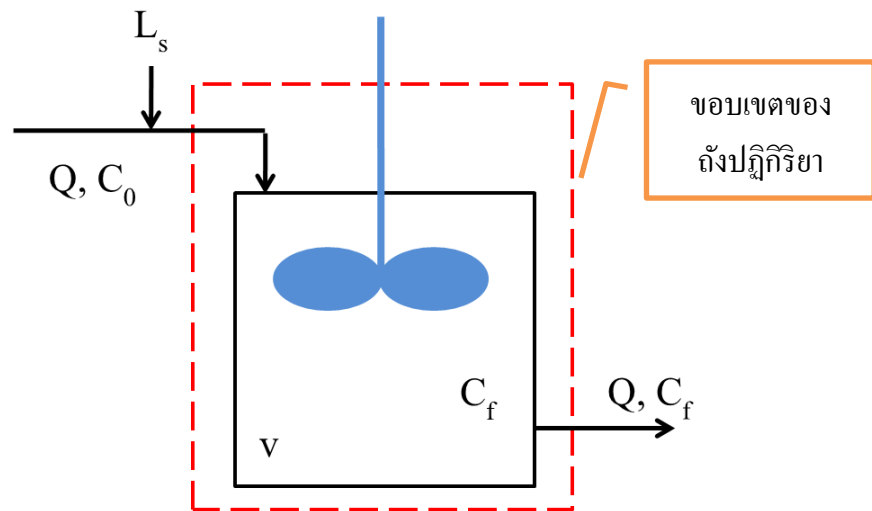
จากการศึกษาวิจัยของ Bradley (1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนัน, 2552); Dwari และคณะ (2004) ซึ่งเป็นงานวิจัยทางการใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไฮโดรไซโคลน ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง และความดันจ่ายเข้า เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการแยกจะสูงขึ้น นอกจากขนาดของอนุภาคจะส่งผลต่อความสามารถในการแยกแล้วตัวไฮโดรไซโคลนเองก็ยังส่งผลต่อความสามารถในการแยกด้วยเช่นกัน ถ้าไฮโดรไซโคลนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กขนาดตัดของอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กตามไปด้วย แต่ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดใหญ่ก็จะมีประสิทธิภาพในการรับโหลดได้สูงกว่า เนื่องจากจุดประสงค์การแยกในไฮโดรไซโคลนนั้นต้องการให้ส่วนทางออกด้านล่างมีแต่ปริมาณของ

ของแข็งหรืออนุภาคทั้งหมดและมีเพียงน้ำใสในส่วนทางออกด้านบน แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ เพราะจะต้องมีส่วนของของเหลวออกมาที่ทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้นหากสามารถออกแบบให้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างเล็กลงจะทำให้น้ำใสไหลออกทางด้านล่างน้อยลง แต่ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างเล็กมากๆอาจจะทำให้ไฮโดรไซโคลอนไม่สามารถแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกได้หมด เนื่องจากถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจะย้อนกลับไปออกทางทางออกด้านบน นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนแล้ว ปัจจัยอีกหนึ่งชนิดที่ต้องให้ความสำคัญไม่แพ้กัน คือ ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอน เมื่อออกแบบให้ความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันจ่ายเข้ามากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลเข้ามากขึ้น แต่ความดันจ่ายเข้าที่มากขึ้นย่อมหมายถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่มากขึ้นตามมาด้วย

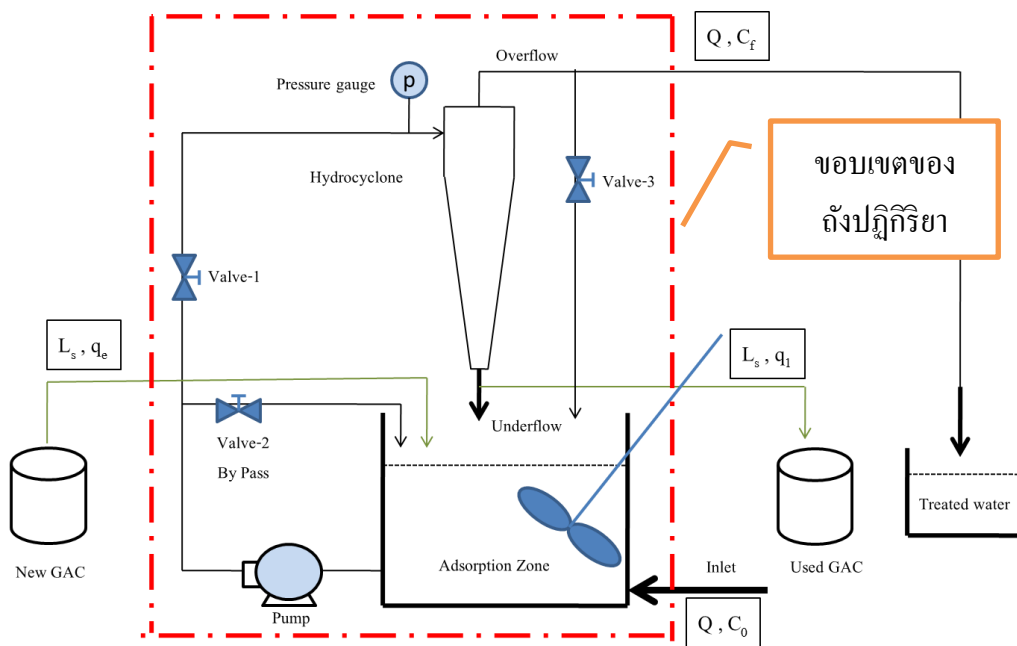
การออกแบบระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก โดยใช้ระบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) จะใช้สมการการคำนวณที่ดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Islam และคณะ (2009) โดยระบบดังกล่าวจะสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อระบบดูดซับที่ออกแบบเป็นระบบที่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Perfectly mixed) และมีการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง (Continuous process) เมื่อพิจารณา จากภาพที่ 2.20 และ 2.21 จะพบว่าสมการสมดุลมวล (Mass balance equation) ของระบบทั้ง 2 คือ

$$L_s \times (q_e - q_1) = Q(C_o - C_f) \quad (2.48)$$

โดย	Q	คือ อัตราการไหลของเฟสที่ต้องการบำบัด
	L_s	คือ อัตราการไหลของเฟสสารตัวกลาง
	C_o	คือ ความเข้มข้นของเฟสที่ต้องการบำบัดที่เข้า
	C_f	คือ ความเข้มข้นของเฟสที่ต้องการบำบัดที่ออก (ผ่านการบำบัด)
	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับของสารตัวกลาง ณ จุดสมดุล
	q_1	คือ ความสามารถในการดูดซับของสารตัวกลาง ณ จุดที่ออกจากระบบ



ภาพที่ 2.20 ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor)
(Islam และคณะ, 2009)



ภาพที่ 2.21 ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเคลื่อนที่แบบ
ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง

จากภาพที่ 2.20 จะสามารถสังเกตได้ว่าถึงปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องโดยทั่วไปเป็นระบบที่ตัวดูดซับยังไม่ได้แยกออกจากของไหลในทันทีทำให้เวลาที่ใช้ในการกักน้ำและตัวดูดซับมีค่าเท่ากัน ทำให้สมการที่ 2.48 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.49 และ 2.50

$$\frac{m}{t} \times (q_e - q_1) = \frac{V}{t} (C_o - C_f) \quad (2.49)$$

หรือ $m \times (q_e - q_1) = V(C_o - C_f) \quad (2.50)$

โดย m คือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์
 V คือ ปริมาตรของถัง
 t คือ เวลาในการกักน้ำในระบบ

แต่ในระบบไฮบริดตัวกลางดูดซับสามารถแยกออกจากของไหลได้ทันที ทำให้เราสามารถควบคุมเวลากักตัวกลางดูดซับในระบบได้ ทำให้เวลาที่ใช้ในการกักน้ำและตัวกลางดูดซับในระบบไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นค่าเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถออกแบบระบบให้มีตัวกลางดูดซับบางส่วนวนเข้ามาในระบบหรือถูกกำจัดออกไปก็ได้ ทำให้สมการที่ 2.48 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.51

$$\frac{m}{SRT} \times (q_e - q_1) = \frac{V}{t} (C_o - C_f) \quad (2.51)$$

โดย SRT คือ เวลาในการกักถ่านกัมมันต์ในระบบ (Solid retention time)

ซึ่งสมการดังกล่าว จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเคลื่อนที่แบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง ต่อไป

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งใน Pilot plant ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไฮโดรไลโซโคลนยีห้อ NYRTEC ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 75 มม. รูปร่างและลักษณะแสดงดังรูปและตารางที่ 3.1
2. เครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์
3. เครื่องสูบน้ำชนิดหอยโข่ง (Centrifugal pump)
4. ใบพัดกวนผสมน้ำชนิด Rushton turbine ขนาด 1.1 กิโลวัตต์
5. เครื่องมือวัดความดัน (Pressure gauge)
6. วาล์วสามทาง
7. ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 350 ลิตร
8. ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตร จำนวน 2 ถัง
9. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บน้ำตัวอย่าง
10. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1. ตะแกรงแยกขนาด (Molecular sieve) ขนาด 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30 และ 35 เมช (Mesh)
2. เครื่องเขย่าแบบวง (Orbital shaker)
3. เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
5. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ 103-105 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ WTB Binder
6. ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. เครื่องวัดพื้นที่ผิว (BET) รุ่น Autosorb 1C ยี่ห้อ Quantachrome Instrument, U.S.A.

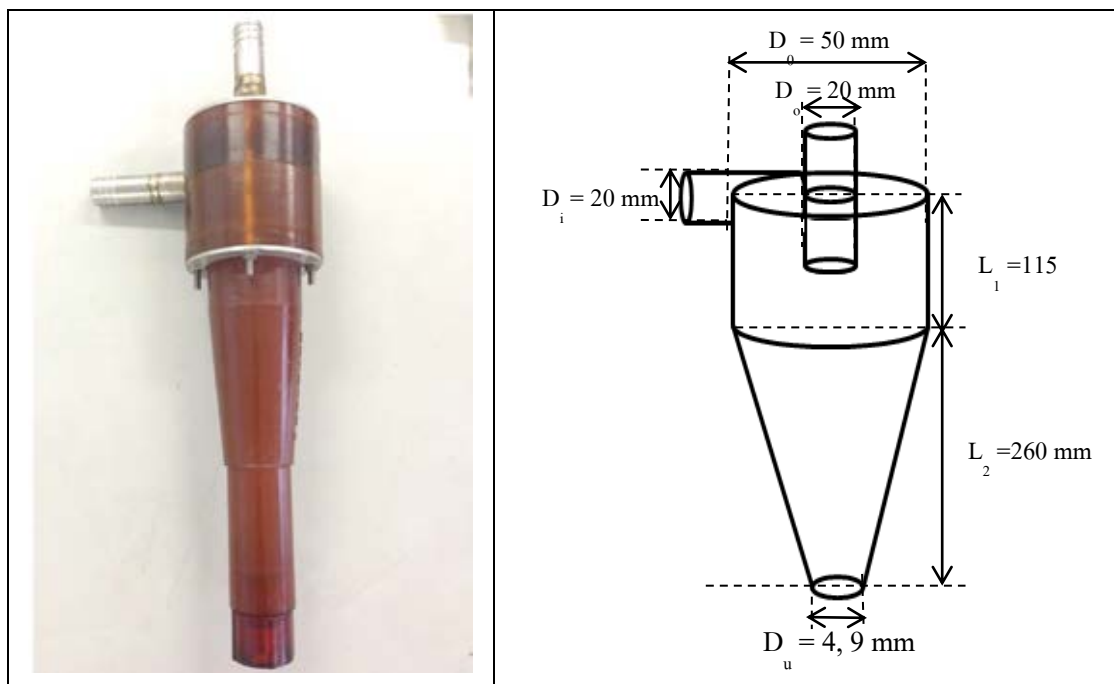
2. หลอดแนสเลอร์ (Nessler Tubes) ทรงสูง ความจุ 50 มม.
3. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV/Visible spectrophotometer รุ่น Genesys 10 UV Scanning, Single cell holder ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific, USA
4. ชุดอุปกรณ์การกรองเพื่อวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย
 - กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน
 - โถดูดความชื้น (Desiccator)
 - บั้มดูดสูญญากาศ
 - ชุดกรวยกรองบุคเนอร์

3.1.4 สารเคมี

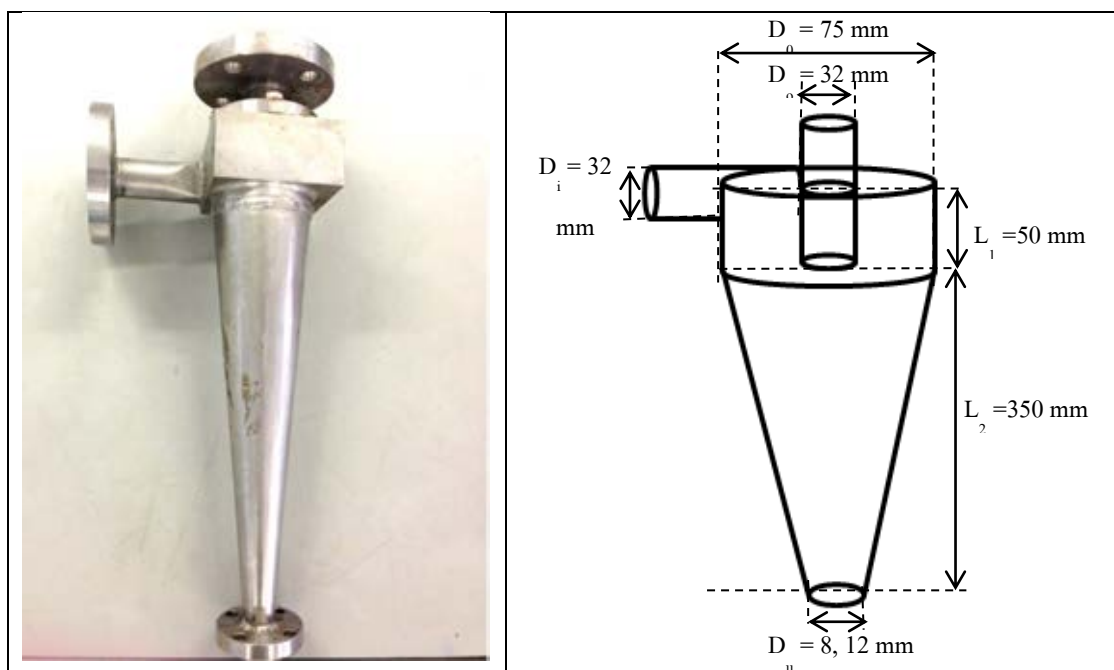
1. ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 ของบริษัท Calgon carbon corporation
2. ถ่านกัมมันต์ Hydrosorb bituminous coal base ของบริษัท Aqua kinetic Ltd.
3. กรดฮิวมิกจากบริษัท ACROS Organics Ltd.
4. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4)
5. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเฉพาะไฮโดรโซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย

รายละเอียด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรโซโคลน	
	50 มม.	75 มม.
1. วัสดุที่ใช้ทำตัวเรือนไฮโดรโซโคลน	โพลียูเรเทน	เหล็กกล้าไร้สนิม
2. เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรโซโคลน (D_c)	50	75
3. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า (D_i)	20	32
4. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านบน (D_o)	20	32
5. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่าง (D_u)	4 และ 9	8 และ 12
6. ความยาวทั้งหมดของไฮโดรโซโคลน (H)	375	400
7. ความยาวของส่วนทรงกระบอก (L_1)	115	50
8. ความยาวของส่วนทรงกรวย (L_2)	260	350



ก.



ข.

ภาพที่ 3.1 รายละเอียดเฉพาะไฮโดรโซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย
ไฮโดรโซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก.) 50 และ (ข.) 75 มิลลิเมตร

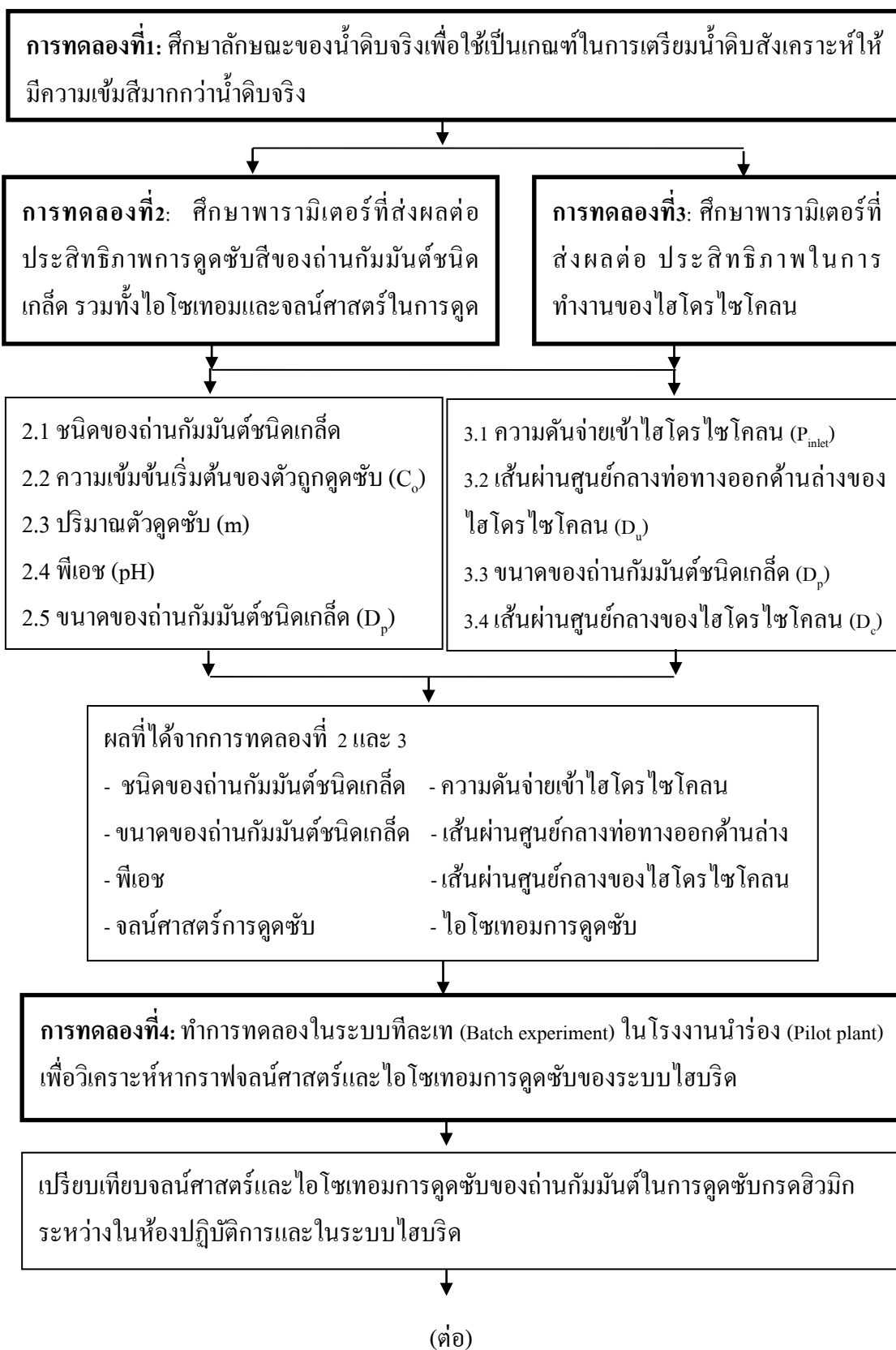
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ในงานวิจัย

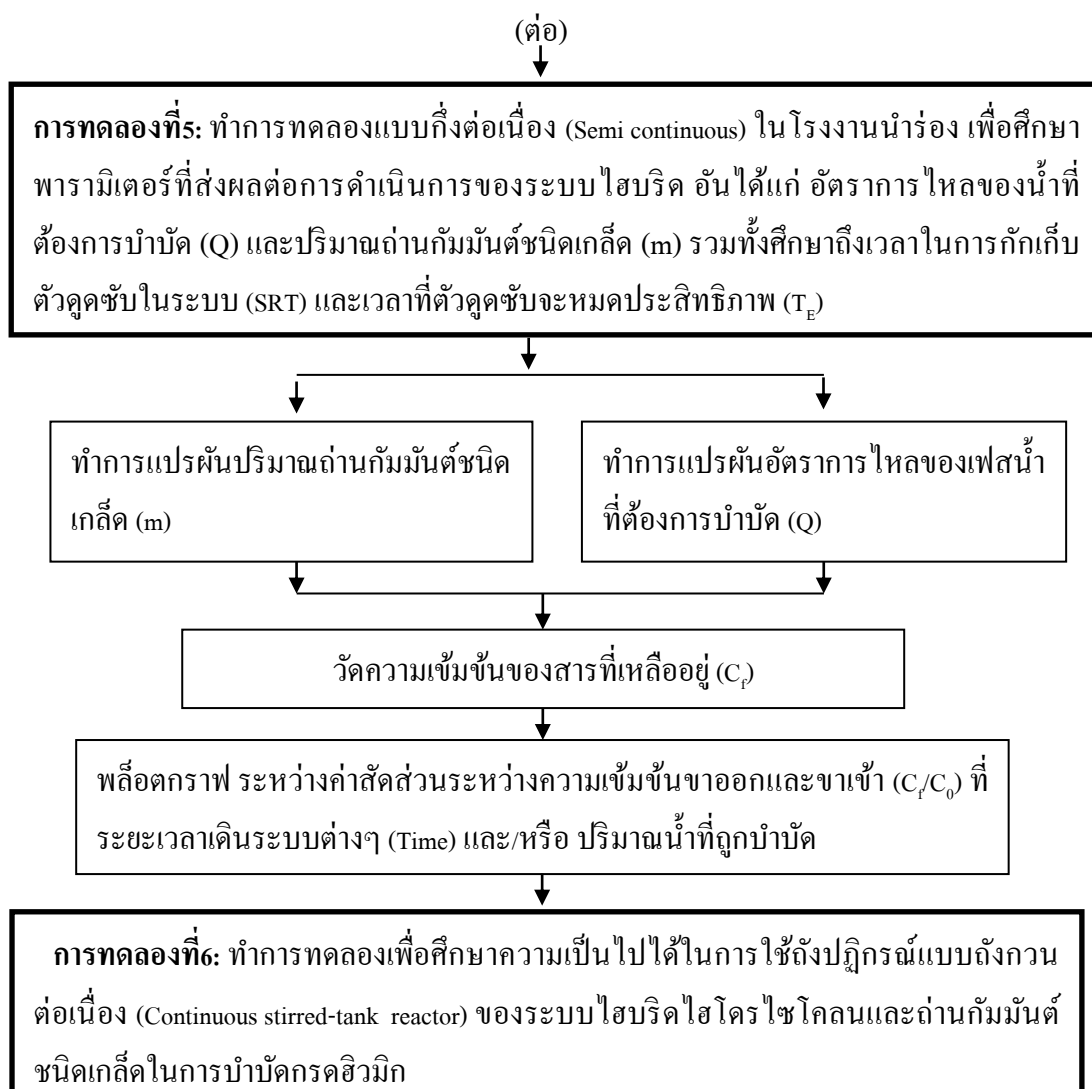
รายละเอียด	Filtrisorb200	Hydrosorb bituminous coal base
1. Particle Size Distribution (US Mesh Size)	12x40	12x40
2. Iodine Number	MIN. 850	MIN. 950
3. ASH Content (% w/w)	-	MIN. 10
4. pH	-	8-9
5. Apparent Density (g/cc)	0.58	0.48
6. True Density (g/cc)	2.11	-
7. Hardness Number (%)	-	MIN. 98
8. Moisture Content (ASTM D 2867) (% w/w)	MAX.2	MIN. 8
9. Surface Area (m ² /g)	839.37	767.43

หมายเหตุ ถ่านกัมมันต์ Filtrisorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base สั่งซื้อจากบริษัท Calgon carbon corporation และบริษัท Aqua kinetic Ltd. ตามลำดับ

3.2 แผนการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 6 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 จะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาความเข้มข้นของน้ำดิบจริง เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นมากกว่าน้ำดิบจริง ต่อมาจะทำการทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เมื่อจบการทดลองที่ 2 จะทำให้ทราบค่าพีเอช ชนิดและขนาดของถ่านกัมมันต์ ใดที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ต่อมาจะทำการทดลองที่ 3 เพื่อเลือกสภาวะอันได้แก่ ขนาดของถ่านกัมมันต์ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนที่สามารถแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดได้ 100% การทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาว่าจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับกรดฮิวมิกระหว่างในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮบริดมีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร การทดลองที่ 5 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณและระยะเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดต่อการดำเนินงานของระบบไฮบริด การทดลองที่ 6 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดซึ่งเดินระบบแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ไปใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิค





3.3 วิธีทำการทดลอง

3.3.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะของน้ำดิบจริงเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการเตรียมน้ำดิบตั้งเคราะห์

1. นำน้ำดิบจากคลองประปาสามเสนมากรองผ่านกระดาษกรองขนาดเฉลี่ยของรูพรุน 0.45 ไมครอน
2. นำตัวอย่างที่ผ่านการแยกตะกอนแล้วไปวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่ใช้เป็นตัวแทนของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดย วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

ผลที่ได้รับคือ ทราบปริมาณของกรดฮิวมิกที่จะใช้ในการเตรียมน้ำคั้นสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.2 การทดลองที่ 2 ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch experiment) ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด อันได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก ปริมาณของตัวกลางดูดซับ ค่าพีเอช และขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด รวมทั้งไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ	● 25±1 องศาเซลเซียส
2. ความเร็วรอบของการเขย่า	● 200 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● Filtrasorb 200 และ Hydrosorb bituminous coal base
2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก	● 10, 30, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปริมาณของถ่านกัมมันต์	● 0.02, 0.1, 0.5, 2, 6, 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร
4. พีเอช	● 5, 6, 7 และ 8
5. ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● 12x14, 16x18, 20x24 และ 30x35 เมช
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ความเข้มข้นที่เหลืออยู่	● เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

- นำถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ขนาด 12x14 เมช จำนวน 0.5 กรัม (10 กรัมต่อลิตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทั้งหมด 8 ขวด โดยถือว่า 1 ขวด แทน 1 ตัวอย่าง
- นำสารละลายกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดดังข้อที่ 1 ในทุกๆขวด
- ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 6 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)
- นำขวดรูปชมพู่ทั้งหมด 8 ขวด ไปเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที

5. ทำการเก็บตัวอย่างทุก 60, 120, 180, 300, 600, 900, 1200 และ 1500 นาที ดังนั้นเมื่อครบ 60 นาทีให้นำขวดรูปชมพู่ขวดที่ 1 ออกจากเครื่องเขย่าเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นที่เหลืออยู่

6. นำตัวอย่างสารละลายที่ได้กรองเพื่อแยกตัวกลางดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C 0.45 ไมครอน

7. นำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

8. เมื่อครบ 120 นาทีให้นำขวดรูปชมพู่ขวดที่ 2 ออกจากเครื่องเขย่าและนำไปวิเคราะห์ข้อมูลดังข้อ 6-7 ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบ 8 ขวด

9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนชนิดของตัวกลางดูดซับจาก Filtrasorb200 เป็น Hydrosorb bituminous coal base

10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกเป็น 10, 30, 70 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนปริมาณตัวกลางดูดซับเป็น 0.02, 0.1, 0.5, 2, 6, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

12. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนพีเอชของสารละลายเป็น 5, 7 และ 8 ตามลำดับ

13. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางดูดซับเป็น 16x18, 20x24 และ 30x35 เมช ตามลำดับ

14. นำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) กับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (C_t) เพื่อให้ได้เวลาที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล

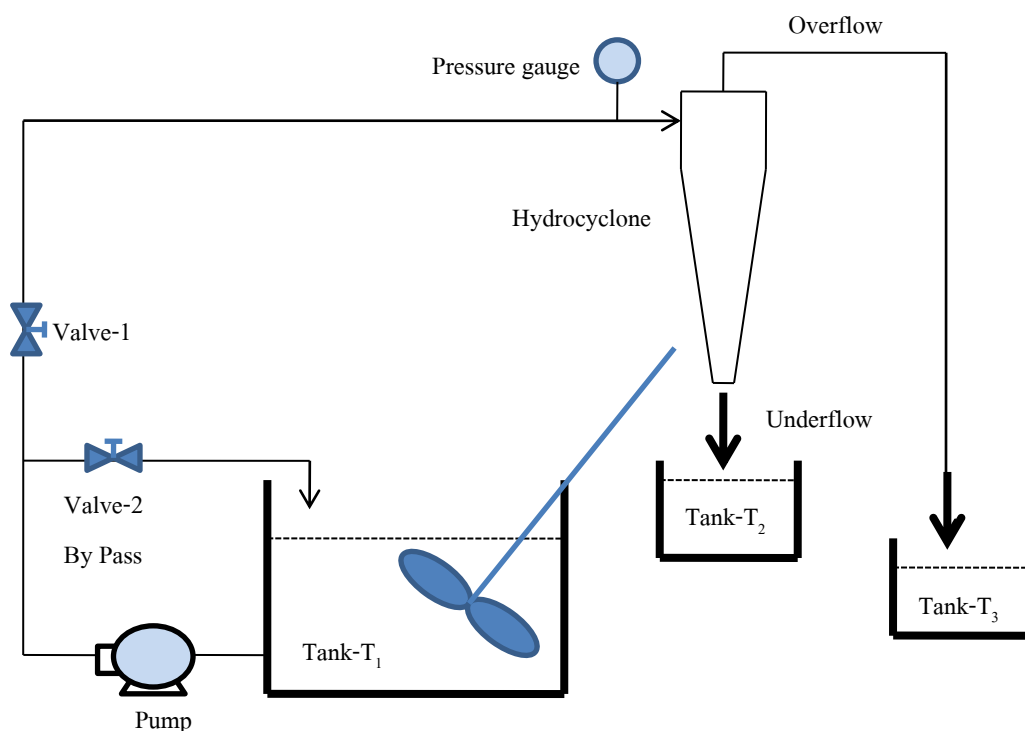
15. นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่สถานะสมดุล (C_e) และความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิก (q_e) ของถ่านกัมมันต์แต่ละขนาดในแต่ละชนิด

ผลที่ได้รับ คือทราบข้อมูล ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์พีเอช และขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ รวมทั้งจลน์ศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองต่อไป

3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ อันได้แก่ ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● จากการทดลองที่ 1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของไฮโดรไซโคลน <ul style="list-style-type: none"> ● เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ● เส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร 	<ul style="list-style-type: none"> ● รูปร่างและลักษณะแสดง ดังตารางที่ 3.1 ● รูปร่างและลักษณะแสดง ดังตารางที่ 3.1 ● 0.5, 1 และ 2 บาร์
2. ความดันจ่ายเข้า	
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง <ul style="list-style-type: none"> ● ที่ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ● ที่ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร 	<ul style="list-style-type: none"> ● 4 และ 9 มิลลิเมตร ● 8 และ 12 มิลลิเมตร
4. ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● 12x14, 16x18, 20x24 และ 30x35 เมช
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	● ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
2. ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)	● การกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือค้างบนกระดาษกรองเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 3

1. ทดลองด้วยไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน 9 มิลลิเมตร
2. เตรียมน้ำประปา 300 ลิตร ผสมกับถ่านกัมมันต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช ปริมาณ 150 กรัม ในถังพลาสติก 350 ลิตร (Tank-T₁)
3. ทำการเดินเครื่องสูบน้ำ Screw rotary displacement pump ที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เพื่อสูบน้ำประปาที่ผสมกับถ่านกัมมันต์จากถังเก็บน้ำ T₁ เข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน การปรับความดันจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอนสามารถปรับได้โดยอัตราการไหลที่เส้นการไหลอ้อม (By pass)
4. จดบันทึกค่าความดันจ่ายเข้าโดยเครื่องมือวัดความดัน (Pressure gauge)
5. ทำการเก็บน้ำตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ที่เวลา 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ
6. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านล่างและทางออกด้านบน โดยการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาณน้ำประมาณ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
7. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเป็น 0.5 และ 2 บาร์ ตามลำดับ

9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนจาก 9 มิลลิเมตร เป็น 4 มิลลิเมตร

10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-7 โดยทำการเปลี่ยนขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเป็น 16×18, 20×24 และ 30×35 เมช ตามลำดับ

11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-7 โดยทำการเปลี่ยนไฮโดรไซโคลนเป็นไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน 8 และ 14 มิลลิเมตร

ผลที่ได้รับคือ ทราบความดันจ่ายเข้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ที่สามารถทำให้ไฮโดรไซโคลนแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (100%) เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

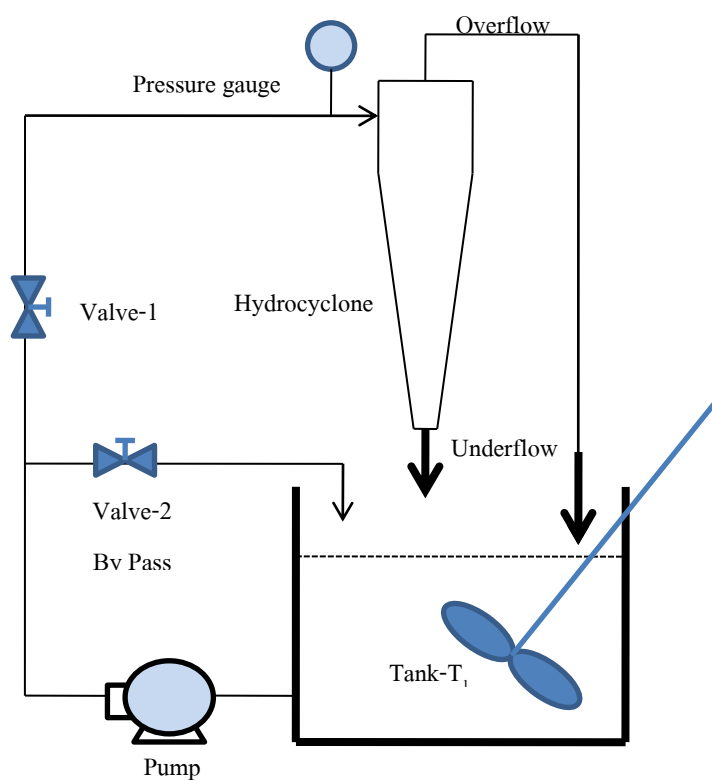
3.3.4 การทดลองที่ 4 ทำการทดลองแบบระบบทีละเท (Batch experiment) ในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) เพื่อวิเคราะห์หากกราฟจลน์ศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับจลน์ศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ	● ขึ้นอยู่กับสภาพจริง
2. เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน	● จากการทดลองที่ 3
3. พีเอช	● จากการทดลองที่ 2
4. ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● จากการทดลองที่ 2
5. ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● จากการทดลองที่ 2 และ 3
6. ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดซิวมิก	● 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	● จากการทดลองที่ 3
8. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน	● จากการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณตัวกลางคูดซับ <ul style="list-style-type: none"> ● ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ● ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 	<ul style="list-style-type: none"> ● ตัวกลางคูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร ● ตัวกลางคูดซับ 0.1, 0.5 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่	● เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 4

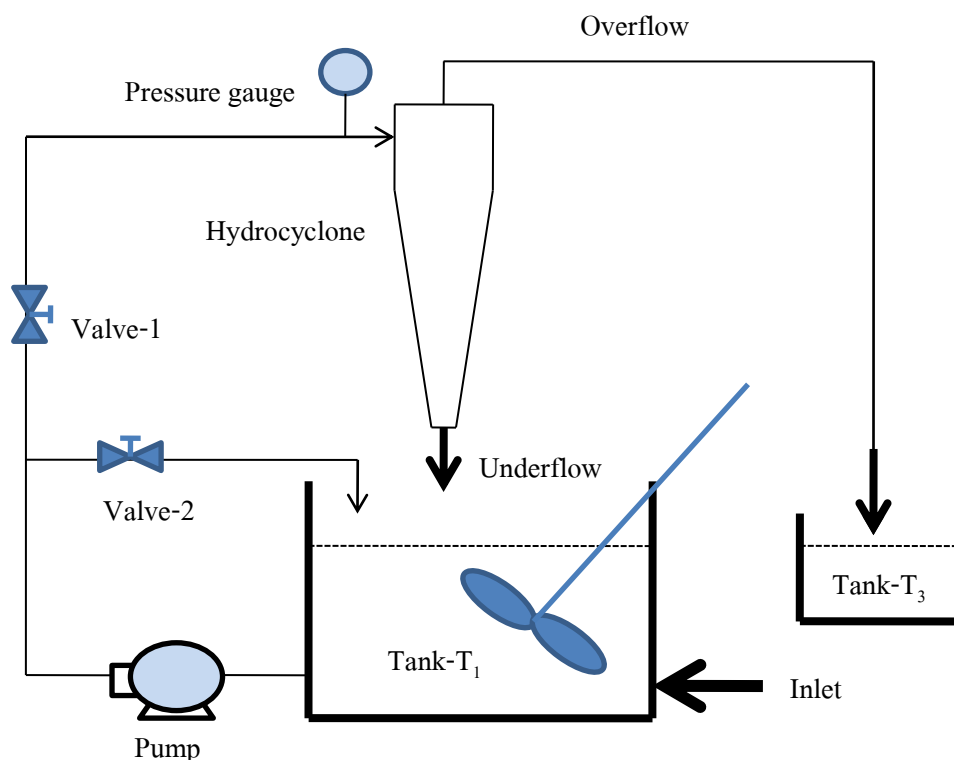
1. เตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมกรดฮิวมิก ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 200 ลิตร ในถังพลาสติกขนาด 350 ลิตร (Tank-T₁)
2. ทำการปรับความดันจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน เลือกใช้ความดันจ่ายเข้าที่เลือกจากการทดลองที่ 3 โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลอ้อม (By pass)
3. นำถ่านกัมมันต์ชนิดที่เลือกจากการทดลองที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เลือกจากการทดลองที่ 2 และ 3 ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร ใส่งไปในถัง 1 (Tank-T₁)
4. เก็บน้ำตัวอย่างในถัง 1 (Tank-T₁) ตามเวลาที่กำหนด คือ 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ
5. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 0.1, 0.5 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำข้อมูลไปเขียนกราฟระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของตัวดูดซับในการกำจัดสี (แกน Y) และเวลา (แกน X)
8. นำข้อมูลไปเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่สภาวะสมดุล (C₀) และความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิก (q_e)

ผลที่ได้รับคือ สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างไอโซเทอมการดูดซับในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก

3.3.5 การทดลองที่ 5 ทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) ในโรงงานนำร่อง เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด อันได้แก่ อัตราการไหลของน้ำที่ ต้องการบำบัด (Q) และปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (m) รวมทั้งศึกษาถึงเวลาในการกักเก็บตัวดูดซับในระบบ (SRT) และเวลาที่ตัวดูดซับจะหมดประสิทธิภาพ (T_E)

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ 2. พีเอช 3. เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน 4. ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 5. ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 6. ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 7. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน 8. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน	<ul style="list-style-type: none"> ● ขึ้นอยู่กับสภาพจริง ● จากการทดลองที่ 2 ● จากการทดลองที่ 3 ● จากการทดลองที่ 2 ● จากการทดลองที่ 2 และ 3 ● 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ● จากการทดลองที่ 2 ● จากการทดลองที่ 3
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณตัวกลางดูดซับ 2. อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์	<ul style="list-style-type: none"> ● 0.5, 1, 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร ● 0.5, 2 และ 4 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่	<ul style="list-style-type: none"> ● เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 5

1. เตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำประปาและกรดฮิวมิก ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถัง 1 (Tank-T₁) ปริมาณ 200 ลิตร
2. นำถ่านกัมมันต์ชนิดที่เลือกจากการทดลองที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เลือกจากการทดลองที่ 2 และ 3 ปริมาณ 100 กรัม ใส่ลงไปในถังที่ T₁
3. ปล่อยให้ น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านเข้าสู่ถังที่ T₁ ตลอดเวลาด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที
4. เก็บน้ำตัวอย่างในถัง 3 (Tank-T₃) ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ
5. นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-5 โดยเปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 200, 500 และ 1000 กรัม ตามลำดับ

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

8. นำข้อมูลไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (แกน Y) และ เวลา (แกน X)

ผลที่ได้รับคือ ทราบถึงผลของ อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด (Q) และปริมาณ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (m) ต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและ ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดกรดฮิวมิก รวมทั้งศึกษาถึงเวลาในการกักเก็บตัวดูดซับในระบบ (SRT) และ เวลาที่ตัวดูดซับจะหมดประสิทธิภาพ (T_E)

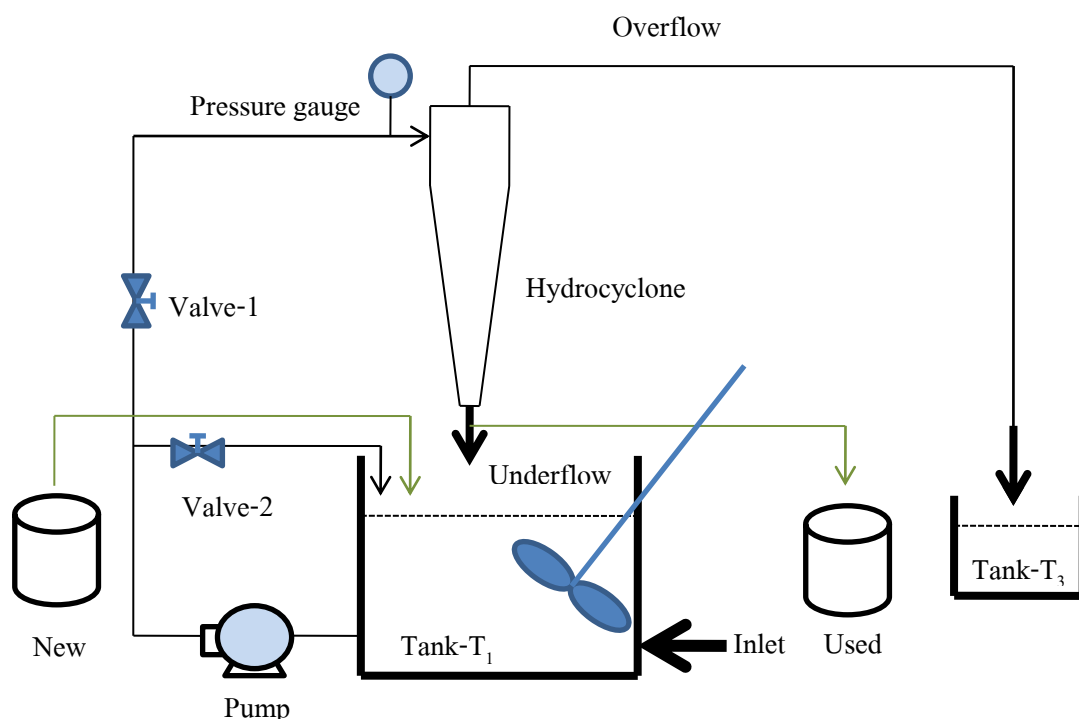
3.3.6 การทดลองที่ 6: ทำการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถังปฏิกรณ์ แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ	● ขึ้นอยู่กับสภาพจริง
2. พีเอช	● จากการทดลองที่ 2
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน	● จากการทดลองที่ 3
4. ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● จากการทดลองที่ 2
5. ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	● จากการทดลองที่ 2 และ 3
6. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	● จากการทดลองที่ 3
7. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน	● จากการทดลองที่ 3
8. อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์	● 1 ลิตรต่อนาที
9. ปริมาณตัวดูดซับเริ่มต้น	● 2.5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราการไหลของตัวดูดซับ	
● ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร	● 0.5, 1.5 และ 5 กรัมต่อนาที
● ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	● 0.2, 0.5 และ 1.5 กรัมต่อนาที

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6

ตัวแปรตาม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลืออยู่	● เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 6

1. เตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำประปาและกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดซัลฟิวริก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถัง 1 (Tank-T₁) ปริมาณ 200 ลิตร
2. ปล่อยให้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดซัลฟิวริก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านเข้าสู่ถังที่ 1 (Tank-T₁) ตลอดเวลาด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที
3. นำถ่านกัมมันต์ชนิดที่เลือกจากการทดลองที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เลือกจากการทดลองที่ 2 และ 3 ปริมาณ 500 กรัม (2.5 กรัมต่อลิตร) ใส่ลงไปในถังที่ 1 (Tank-T₁)
4. เก็บน้ำตัวอย่างในถังที่ 3 (Tank-T₃) นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ (C_p) ที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที

5. เมื่อผ่านไป 30 นาที ให้ทำการป้อนถ่านกัมมันต์ให้กับระบบด้วยอัตราการไหลของตัวดูดซับ 0.5, 1.5 และ 5 กรัมต่อนาที (อัตราการป้อนถ่านกัมมันต์=อัตราการเอาถ่านกัมมันต์ออก)
6. เก็บน้ำตัวอย่างในถังที่ 3 (Tank-T₃) นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ (C) ที่เวลา 60, 90, 120, 150, 180 และ 210 นาที
7. นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
8. กำหนดความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (q_e)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times Q}{L_s}$$

- โดย q_e คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_e คือ ความเข้มข้น ณ จุดสมดุล ของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 Q คือ อัตราการไหลของน้ำเสียตั้งเคราะห์ (ลิตร/นาที)
 L_s คือ อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ (กรัม/นาที)

ผลที่ได้รับคือ ทราบความเป็นไปได้ในการใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ของระบบไฮบริดไฮโดรไลโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมกับกรดฮิวมิกจากบริษัท ACROS Organics Ltd. โดยภายในงานวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 ส่วน คือ

(1) การศึกษาลักษณะของน้ำดิบจริงเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นมากกว่าน้ำดิบจริง

(2) การทดลองแบบทีละเทในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด อันได้แก่ ชนิด ขนาด (D_p) และปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (mass) ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก (C_0) และพีเอช (pH) รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ

(3) การทดลองในโรงงานนำร่อง เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด อันได้แก่ ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน (P_{inlet}) ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (D_p) เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (D_p) และเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_c)

(4) ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch experiment) ในโรงงานนำร่อง เพื่อที่จะเปรียบเทียบทั้งจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

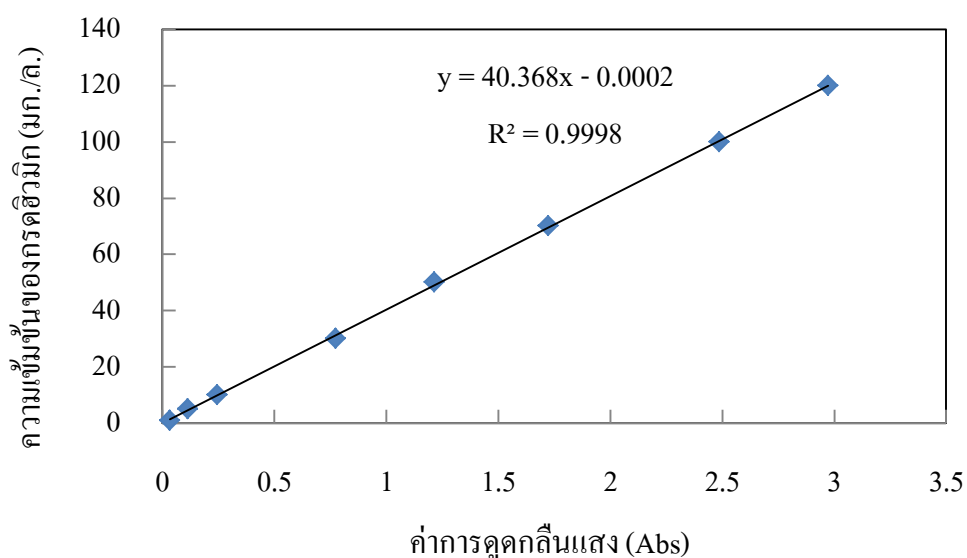
(5) ทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) ในโรงงานนำร่อง เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด อันได้แก่ อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด (Q) ปริมาณและระยะเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

(6) ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา

4.1 ผลการศึกษาลักษณะของน้ำดิบจริง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำดิบจริงจากคลองประปาสามเสน ในวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2555 หลังจากนั้นนำมากรองเพื่อแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำ และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ค่าที่อ่านได้จะถูกนำไปแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกโดยค่าคงที่จากกราฟมาตรฐาน

กราฟมาตรฐานสามารถสร้างได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำสังเคราะห์และค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์กรดฮิวมิกความเข้มข้นหลายๆค่า หลังจากนั้นนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมแต่ละค่าไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 กราฟมาตรฐานสารละลายกรดฮิวมิก

จากภาพที่ 4.1 จะได้สมการความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.1

$$\text{ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)} = (40.368 \times \text{Abs}) - 0.0002 \quad (4.1)$$

โดยจากผลการทดลองพบว่า น้ำดิบจริงมีค่าการดูดกลืนแสง Abs เท่ากับ 0.12 ซึ่งเมื่อนำไปแปลงเป็นปริมาณความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำ ที่ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จะได้ปริมาณกรดฮิวมิกในน้ำดิบประมาณ 4.84 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเทียบเป็นปริมาณความเข้มข้นของกรดฮิวมิก น้ำดิบจริงจะมีปริมาณกรดฮิวมิกประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการสมมติว่าในเหตุการณ์น้ำท่วมปริมาณกรดฮิวมิกจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกในน้ำเสียที่จะสังเคราะห์ คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในการทดลองศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซับจะเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกสูงขึ้นอัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นทำให้ได้ผลข้อมูลในการดูดซับเร็วขึ้น

4.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซับ

4.2.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base

ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด 2 ยี่ห้อ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 ของบริษัท Calgon carbon corporation และถ่านกัมมันต์ชนิด Hydrosorb bituminous coal base ของบริษัท Aquatic kinetic โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ทำมาจากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) จากการศึกษางานวิจัยเบื้องต้นที่ผ่านมา พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดและนิยมนำมาใช้ในการดูดซับกรดฮิวมิกมีอยู่ 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากถ่านหินบิทูมินัสและกะลามะพร้าว โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากถ่านหินบิทูมินัส เนื่องจากถ่านกัมมันต์ประเภทดังกล่าวทำมาจากถ่านหินซึ่งน่าจะมีความแข็งแรงมากกว่า ถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุเซลลูโลสที่มาจากพืช การที่เลือกถ่านกัมมันต์ที่มีความแข็งแรงและไม่แตกง่ายเนื่องจากถ่านกัมมันต์ดังกล่าวจะต้องถูกนำไปแยกโดยไฮโดรไซโคลนการแตกของอนุภาคจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property) ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด วิเคราะห์โดยการหาไอโซเทอมการดูดซับถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซ N_2 ที่อุณหภูมิ 77.35 เคลวิน ดังนั้น (1) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, S_{BET}) สามารถหาได้จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยสมการ BET (Brunauer–Emmett–Teller) (2) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume, V_p) สามารถประมาณได้จากปริมาณที่ก๊าซไนโตรเจนดูดซับที่ $p/p_0 = 0.99$ (3) ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volumes, V_{mi}) สามารถประมาณได้จากวิธีที-พล็อต (t-plot analysis) (4) ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore volume, V_{me}) สามารถประมาณได้จากความแตกต่างระหว่างปริมาตรรูพรุนรวมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

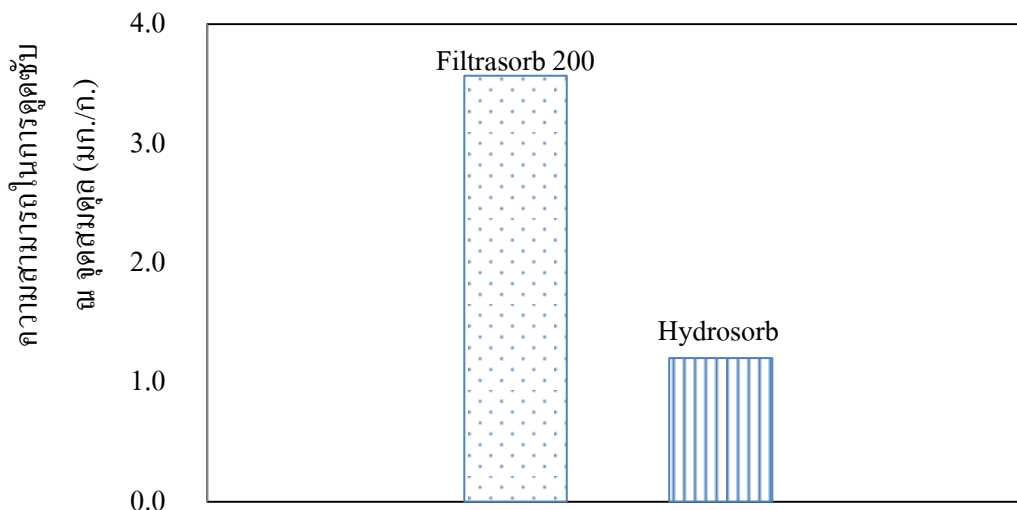
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base

รายละเอียด	Filtrisorb200	Hydrosorb bituminous coal base
1. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	839.37	767.43
2. ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	2.74	1.46
3. ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)	0.23	0.31
4. ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)	0.34	0.06
5. ปริมาตรรูพรุนรวม (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)	0.57	0.37
6. ร้อยละรูพรุนขนาดกลาง (ร้อยละ)	59.94	16.74

4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

ทำการทดลองเบื้องต้น (Preliminary tests) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิก ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช และใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 1500 นาที

จากภาพที่ 4.2 พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันเป็นอย่างมากถึงแม้จะทำมาจากวัตถุดิบประเภทเดียวกัน โดยถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base มีความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 3.57 และ 1.20 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าค่อนข้างต่ำทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด (Commercial grade) ที่หาซื้อได้ง่ายไม่ได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่พัฒนามาเพื่อให้เหมาะสมกับการดูดซับกรดฮิวมิก อย่างเช่นงานวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005) ที่มีการเพิ่มปริมาณรูพรุนขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ให้มากขึ้น หรืองานวิจัยของ Maghsoodloo และคณะ (2011) ที่มีการดัดแปลงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยไคโตซาน



ภาพที่ 4.2 ค่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base

จากการสังเกตคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ดังตารางที่ 4.1 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ Filtrasorb200 และ Hydrosorb bituminous coal base เท่ากับ 839.37 และ 767.43 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีการดูดซับที่ว่าเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005) พบว่าโดยธรรมชาติแล้วกรดฮิวมิกเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงหากรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของกรดฮิวมิก เนื่องจากกรดฮิวมิกไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปถูกดูดซับโดยพื้นที่ผิวภายในรูพรุนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยกรดฮิวมิกจะสามารถถูกดูดซับได้ดีเมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) จากตารางที่ 4.1 พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.74 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลาง (20 นาโนเมตร < ขนาดรูพรุนเฉลี่ย < 500 นาโนเมตร) และมีปริมาณของรูพรุนขนาดกลางร้อยละ 59.94 ของปริมาณทั้งหมด ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชนิด Hydrosorb bituminous coal base มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.46 นาโนเมตรซึ่งอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก (< 20 นาโนเมตร) และมีปริมาณรูพรุนขนาดกลางเพียงร้อยละ 16.74 ของปริมาณทั้งหมด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 มีความเหมาะสมในการดูดซับกรดฮิวมิกมากกว่า Hydrosorb bituminous coal base

4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ (C_0)

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิก ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 10, 30, 50, 70, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช และปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส โดยค่าความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3

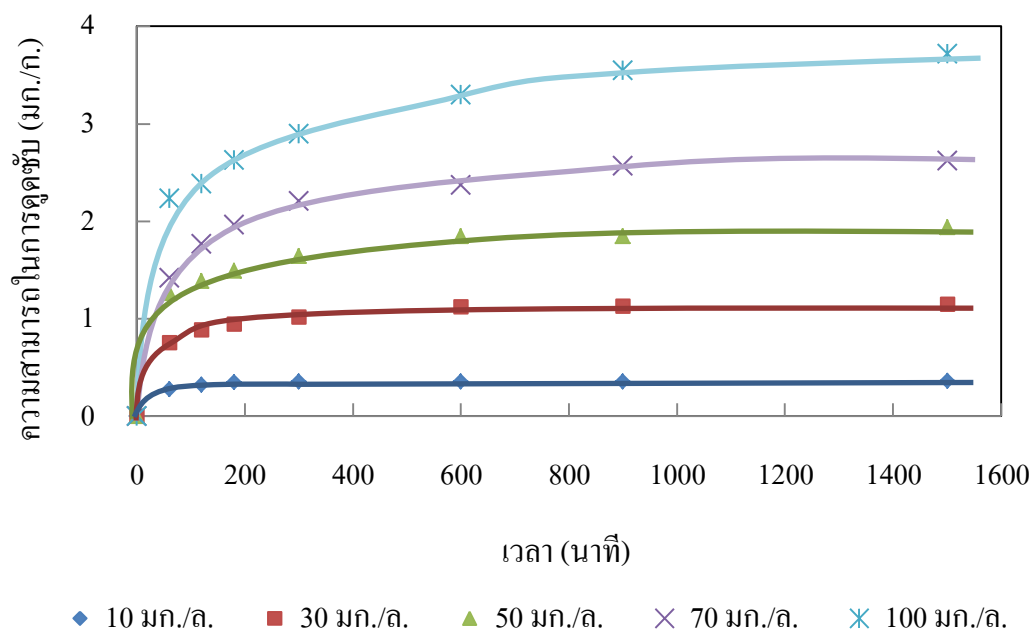
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (4.2)$$

$$\eta = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \quad (4.3)$$

โดย η	คือ ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ณ จุดสมดุล (มก./ก.)
C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล (มก./ล.)
C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มก./ล.)
V	คือ ปริมาตรของตัวถูกดูดซับ (ล.)
M	คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (ก.)

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 10, 30, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ (ที่เวลา 1500 นาที) เท่ากับ 0.37, 1.18, 1.96, 2.62 และ 3.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากการดูดซับถือเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) ชนิดหนึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีการเคลื่อนที่โดยการแพร่ (Diffusion) จากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง โดยอาศัยแรงผลักดัน (Driving force) ซึ่งหมายถึงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารในสองบริเวณ (Gradient concentration) ดังนั้นการที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดความแตกต่างที่มากขึ้นระหว่างความเข้มข้นในสารละลาย (Bulk solution) และความเข้มข้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ (Solid interface) เป็นผลให้เกิดแรงผลักดัน (Driving force) เพิ่มสูงขึ้น (Piccin และคณะ, 2012)

นอกจากนี้จากผลการทดลองยังสามารถสังเกตได้อีกด้วยว่า ในทุกกรณีอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการดูดซับ หลังจากนั้นอัตราเร็วในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงโดยสามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟที่ลดลง หลังจากนั้นจะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับได้ในที่สุด ทั้งนี้ก็เพราะในช่วงแรกของการดูดซับพื้นผิวของตัวดูดซับยังเป็นพื้นผิวที่สะอาดทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราเร็วในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้ก็เพราะเกิดแรงผลัก (Repulsive force) ระหว่างโมเลกุลของกรดฮิวมิกบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และ โมเลกุลของกรดฮิวมิกในสารละลายของเหลว (Srivastava และคณะ, 2006)



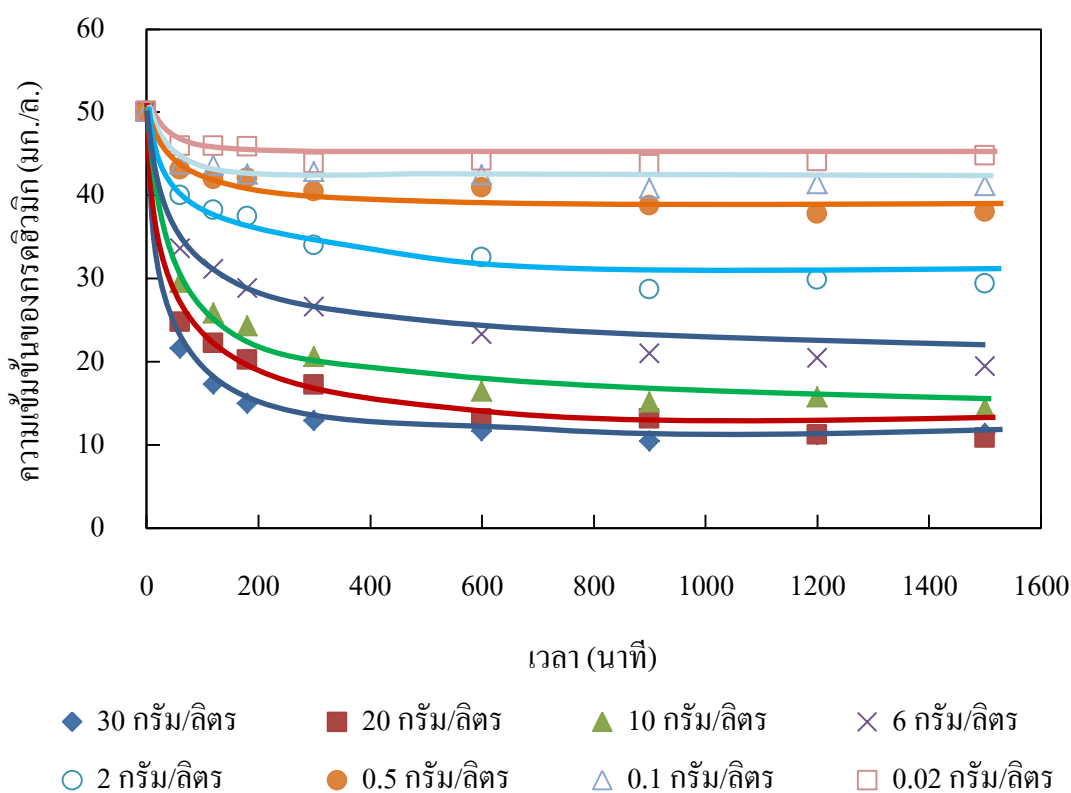
ภาพที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ (Mass)

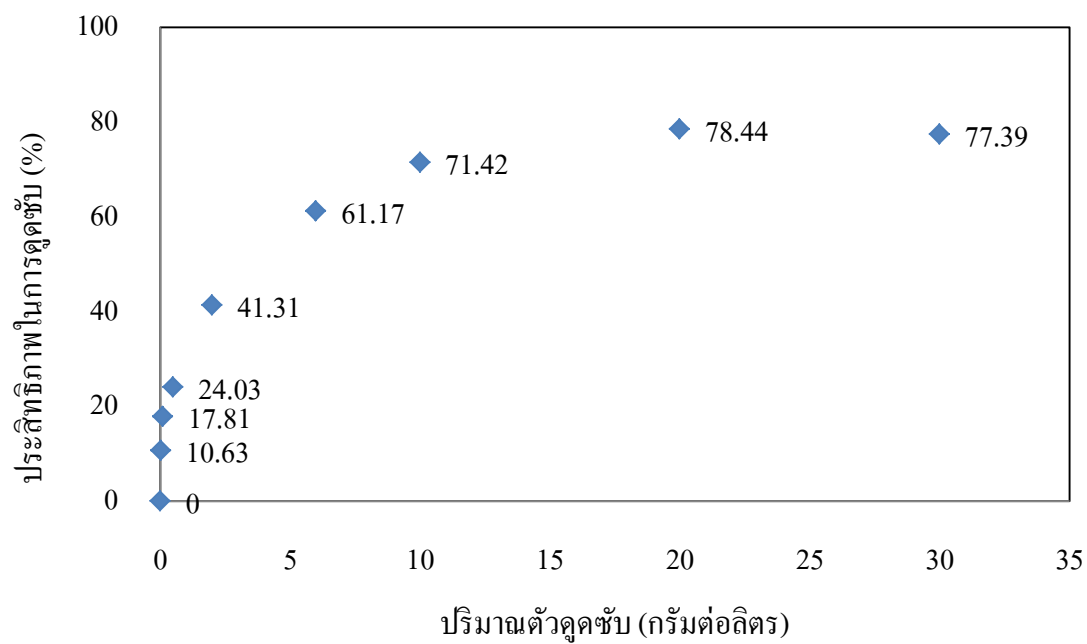
ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิก ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช และปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.02-30 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับลดลงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับก็จะลดลงตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับจากภาพที่ 4.5 ผลการ

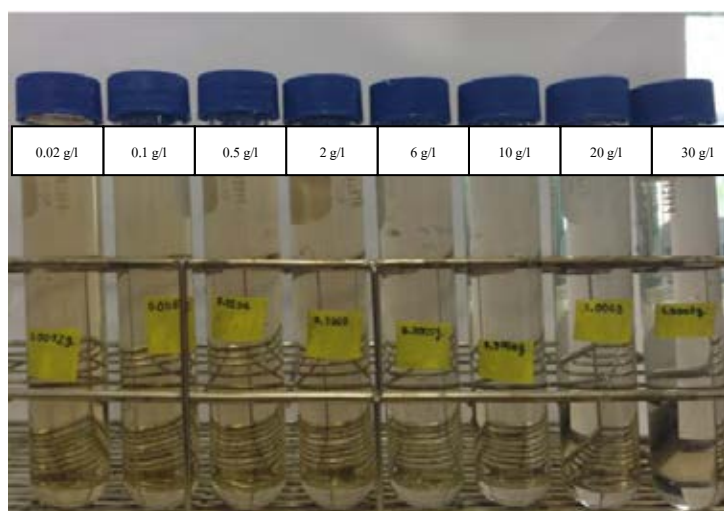
ทดลองสามารถอธิบายได้ 2 กรณี คือ (1) เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์น้อยกว่า 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.63, 17.81, 24.03, 41.31, 61.17, 71.42 และ 78.44 เมื่อใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 0.02, 0.1, 0.5, 2, 6, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มตัวกลางดูดซับเปรียบได้กับการเพิ่มพื้นผิวและบริเวณ (Adsorption site) ในการดูดซับ (Srivastava และคณะ, 2006) ดังนั้น เมื่อพื้นผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (2) เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์มากกว่าหรือเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร จะพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและค่อยๆเข้าสู่สมดุลในที่สุด โดยจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่ปริมาณตัวกลางดูดซับ 20 และ 30 กรัมต่อลิตรมีความใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 78.44 และ 77.39 ตามลำดับ ทั้งนี้ก็เพราะความเข้มข้นของกรดฮิวมิคบนพื้นผิวของตัวดูดซับและในสารละลายอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งกันและกัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ควรเลือกใช้ คือ 20 กรัมต่อลิตร เนื่องจากใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์น้อยกว่าที่ประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮิวมิคของ Filtrasorb200 ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.6 ความขุ่นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับเพิ่มขึ้น (ที่เวลาในการดูดซับ 1500 นาที)

4.2.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ (pH)

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิก ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดเบสมีค่า 5 ถึง 8 โดยปรับค่าความเป็นกรดเบสด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 โดยใช้ข้อมูลของการดูดซับที่เวลาในการดูดซับ 1500 นาที เนื่องจากเวลาดังกล่าวการดูดซับอยู่ในสถานะสมดุลแล้ว

จากการศึกษางานวิจัยของ Lorenc-Grabowska และ Gryglewicz (2005); Imyim และ Prapalimrungsi (2010); Rauthula และ Srivastava (2011); Maghsoodloo และคณะ (2011) ซึ่งเป็นงานวิจัยทางด้านการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆดูดซับกรดฮิวมิกพบว่า ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับใน 2 ลักษณะ คือ

(1) ผลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับและกรดฮิวมิกที่ละลายในน้ำ

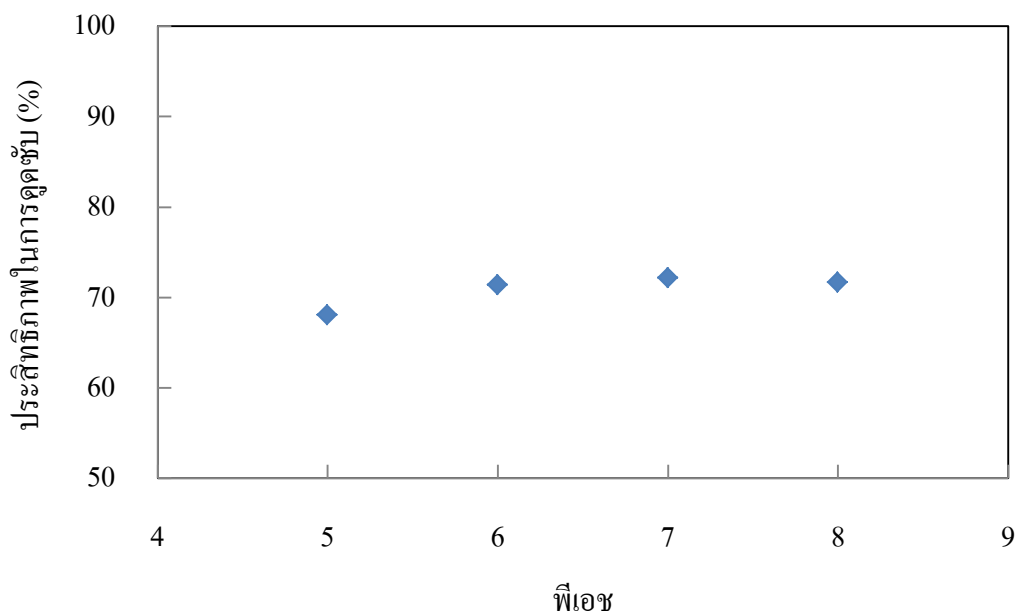
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ศักย์ซีต้าของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 และกรดฮิวมิกมีประจุเป็นศูนย์ (Zero Point of Charge, pH_{pzc}) ที่ pH เท่ากับ 7.2-8.2 (Chen และ Wu, 2004) และ 2 (Rauthula และ Srivastava, 2010) ตามลำดับ โดยเมื่อ $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ ประจุที่ผิวจะเป็นบวก ในทางตรงกันข้าม เมื่อ $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ ประจุที่ผิวจะเป็นลบและจะเป็นลบมากขึ้น เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทดลองนี้ทำการทดลองในช่วง pH 5-8 ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าในทุกช่วงค่าพีเอชที่ทำการทดลองประจุที่ผิวของ Filtrasorb200 มีแนวโน้มเป็นบวก ในขณะที่ประจุที่ผิวของกรดฮิวมิกมีลักษณะเป็นประจุลบ ดังนั้นกลไกการดูดซับในกรณีนี้ คือ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

(2) ผลต่อขนาดและรูปร่างของกรดฮิวมิก

เมื่อพีเอชลดลง กรดฮิวมิกจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากเส้นตรง (Linear structure) เป็นทรงกลม (Coil structure) แต่อย่างไรก็ตามกรดฮิวมิกที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม จะเกิดการรวมตัวกัน อันเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนบนพื้นผิวทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งกรดฮิวมิกที่ใหญ่ขึ้นนี้อาจทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากขนาดโมเลกุลของกรดฮิวมิกอาจมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เท่ากับร้อยละ 67.85, 71.20, 71.93, และ 71.44 ตามลำดับ จะสามารถสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพีเอชที่ใช้ในการทดลองมีความใกล้เคียงกัน

โดยที่พีเอช 5 ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มที่จะลดลงทั้งนี้อาจเป็นเพราะอิทธิพลทางขนาดและรูปร่างของกรดฮิวมิกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อพีเอชลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

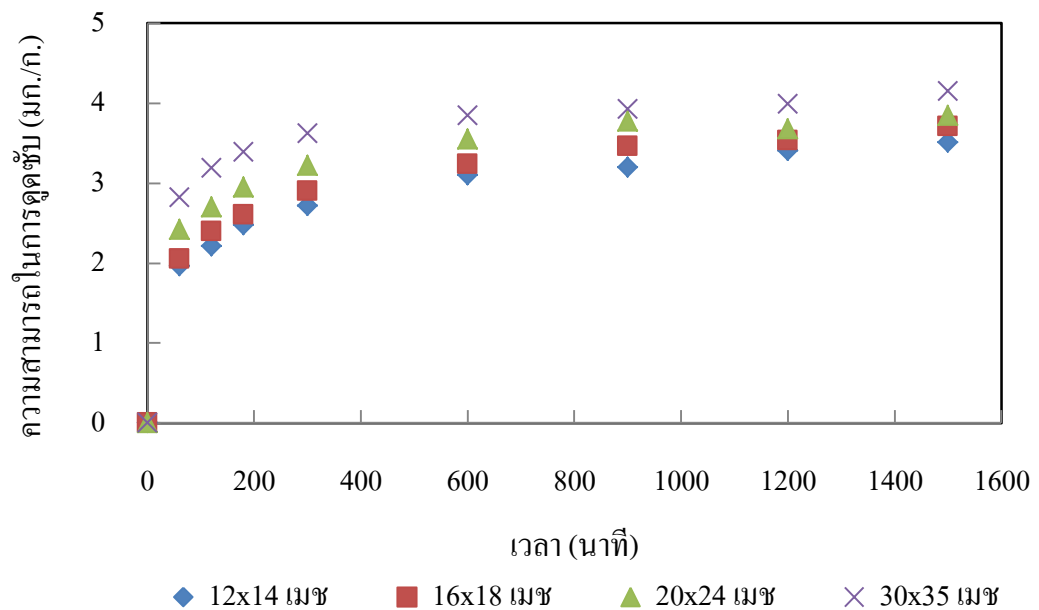


ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกที่ค่าความเป็นกรดเบสต่างกัน (ที่เวลาในการดูดซับ 1500 นาที)

4.2.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดตัวดูดซับที่มีต่อการดูดซับ (D_p)

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิก ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช (1410-1680 ไมโครเมตร), 16x18 เมช (1000-1160 ไมโครเมตร), 20x24 เมช (710-840 ไมโครเมตร), และ 30x35 เมช (500-590 ไมโครเมตร) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปแล้วการใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุน เช่น ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับสารชนิดหนึ่งๆ ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวดูดซับ เพราะพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน (กฤษณ์ พลรัตน์, 2547) แต่จากการทดลอง ดังภาพที่ 4.8 กลับพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์เล็กลง



ภาพที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Filtrasorb200 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ต่างกัน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโดยทั่วไปแล้วขนาดโมเลกุลของกรดฮิวมิกมักจะมีขนาดใหญ่ โดยงานวิจัยของ Muller (1996) รายงานการกระจายขนาดโมเลกุลของกรดฮิวมิกที่เกิดจากคอลลอยด์ (Colloid) ปากแม่น้ำอยู่ในช่วง 2-300 นาโนเมตร ส่วนงานวิจัยของ Pinheiroa และคณะ (1996) พบการกระจายของขนาดโมเลกุลของกรดฮิวมิกที่เกิดจากถ่านหินอยู่ในช่วง 30-85 นาโนเมตร ในขณะที่การวิเคราะห์ BJH adsorption พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ถูกนำมาใช้ในการทดลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย 2.739 นาโนเมตร ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ในกรณีนี้อาจกล่าวได้ว่ากลไกในการดูดซับในงานวิจัยนี้เป็นการดูดซับภายนอก (External process) ซึ่งถือได้ว่าขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้นด้วยปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากัน ขนาดของตัวดูดซับที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ของกรดฮิวมิก ทำให้กรดฮิวมิกไม่สามารถเข้าไปถูกดูดซับภายในรูพรุนที่ลึกลงไปเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นคอขวด (Ink-well หรือ Bottle neck) ของถ่านกัมมันต์ (Daifullah และ คณะ, 2004) และโดยทั่วไปแล้วการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กลงเกิดจากการนำถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่มาบดหรือไม่ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกและเปิดออกมาของโครงสร้างคอขวดทำให้ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore

volume) ของถ่านกัมมันต์มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้นด้วย (Daifullah และ คณะ, 2004)

4.2.7 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetic)

เพื่อที่จะทราบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับของกรดฮิวมิกและถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เป็นแบบใด ข้อมูลที่ได้จากการทดลองอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่มีต่อการดูดซับ จึงถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression) โดยสมการที่นิยมใช้อธิบายจลนศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) และปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e + \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4.4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.5)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ. ที่จุดสมดุล (มก./ก.)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ. ที่เวลาต่างๆ (มก./ก.)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (นาที ⁻¹)
	k_2	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับสอง (ก./มก.*นาที)

โดยข้อมูลในการดูดซับจะถูกนำมาเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t สำหรับการศึกษปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน และกราฟระหว่าง t/q_t กับ t สำหรับการศึกษปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.8) หลังจากนั้นค่าคงที่ k_1 , k_2 และ q_e จะถูกคำนวณจากความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟ (ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.1 และ ข.2) โดยค่าคงที่และตัวแปรต่างๆของปฏิกริยาทั้ง 2 ชนิด สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยา

C _o (mg/l)	q _e (ทดลอง) (mg/g)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน			ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			
		q _e (ทำนาย)	k ₁	R ²	q _e (ทำนาย)	k ₂	k ₂ q _e ²	R ²
10	0.37	0.074	-0.0023	0.6866	0.37	0.1451	0.020	0.9998
30	1.17	0.766	-0.0018	0.8779	1.19	0.0196	0.028	0.9998
50	1.96	0.902	-0.0025	0.8569	2.01	0.0087	0.0035	0.9996
70	2.66	1.379	-0.0028	0.9417	2.75	0.0052	0.039	0.9997
100	3.75	2.233	-0.0028	0.9730	3.90	0.0031	0.047	0.9991

โดยผลการคำนวณดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R²) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนมีค่าอยู่ในช่วง 0.6866-0.9730 ซึ่งน้อยกว่าค่า R² ของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน โดยมีค่าสูงถึง 0.9991-0.9998 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหนึ่งมาก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่าความสามารถในการดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเห็นได้ว่าค่านี้ที่คำนวณจากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (q_{e, ทำนาย}) มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง (q_{e, ทดลอง}) ซึ่งแสดงว่าการทดลองในงานวิจัยนี้ สมการทางจลนศาสตร์การดูดซับที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการอธิบาย คือปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (k₂) ในสมการแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยหากค่า k₂ มีค่าน้อยแสดงว่าสามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้มาก เมื่อใช้สารตัวกลางเท่ากัน 1 กรัม จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่า k₂ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10, 30, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า 0.1451, 0.0196, 0.0087, 0.0052, 0.0031 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ ค่า k₂ ที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีการดูดซับที่ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น (อิสริยาภรณ์ บุญยั้ง, 2552)

ค่า k₂q_e² แสดงถึง ปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ 1 กรัม ในเวลา 1 นาที หรืออัตราเร็วในการดูดซับ จะเห็นได้ว่าค่า k₂q_e² ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10, 30, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า 0.020, 0.028, 0.035, 0.039, 0.047 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที ตามลำดับ ซึ่ง

ค่าที่ได้ค่อนข้างจะเป็นไปตามทฤษฎีการดูดซับที่ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (อิสริยาภรณ์ บุญยยืน, 2552)

4.2.8 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)

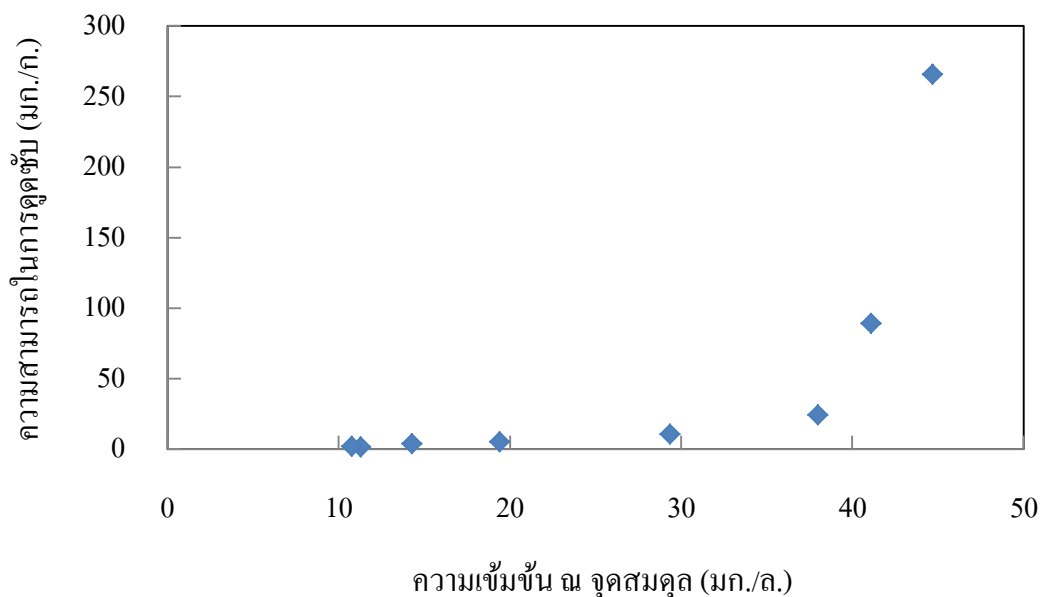
ไอโซเทอมการดูดซับทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิก ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.02, 0.1, 0.5, 2, 6, 10, 20, และ 30 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการดูดซับ 1500 นาที จากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาเขียนกราฟระหว่างความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิก (q_e) ของถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่สถานะสมดุล (C_e)

จากการพิจารณาเบื้องต้นจากกราฟไอโซเทอมการดูดซับ ดังภาพที่ 4.9 พบว่า ยังไม่พบแนวโน้มที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสูงสุด ซึ่งอาจจะเป็นได้ว่าปรากฏการณ์การดูดซับไม่ได้เป็นแบบชั้นเดียว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งในการนำกราฟไอโซเทอมไปศึกษาเปรียบเทียบกับสมการคณิตศาสตร์แบบต่างๆ เพื่อยืนยันปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยสมการที่นิยมนำมาทำนายสมดุลการดูดซับ คือ แลงค์เมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) มีรูปแบบสมการตามสมการที่ 4.6 และ ฟรุนด์ลิชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) มีรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 4.7

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (4.6)$$

$$q_e = K C_e^{1/n} \quad (4.7)$$

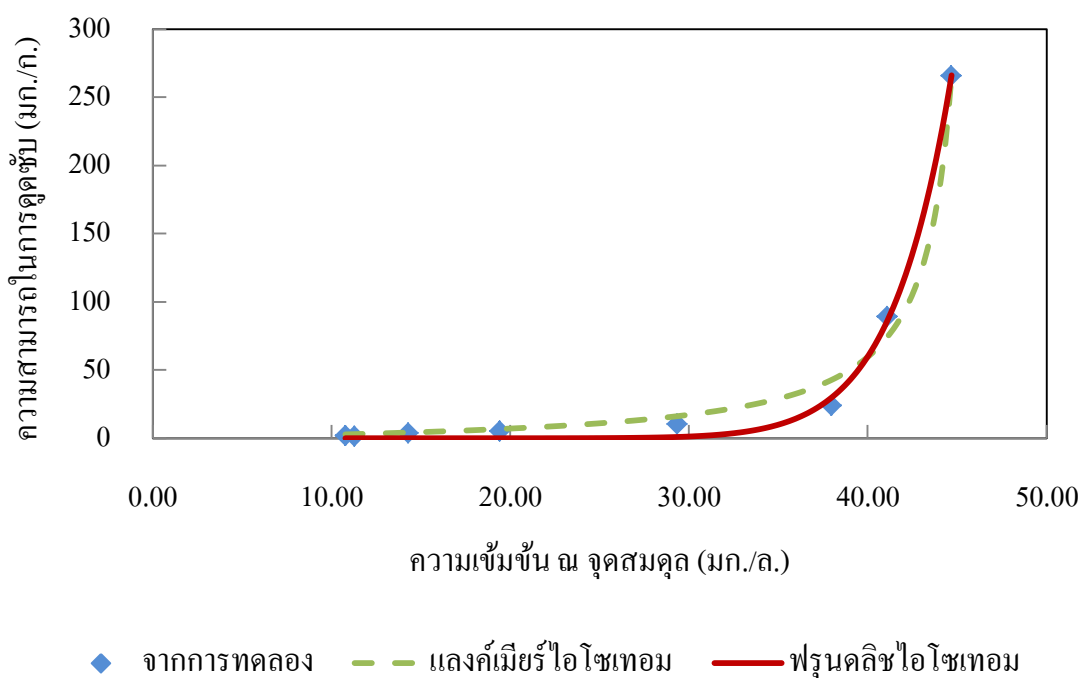
เมื่อ q_m	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
b	คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตร/มิลลิกรัม)
K	คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
$1/n$	คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตร/กรัม)



ภาพที่ 4.9 ไอโซเทอมการดูดซับของกรดฮิวมิกและถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200

โดยผลการทดลองดังภาพที่ 4.9 จะถูกนำมาวิเคราะห์ห้กับสมการทางคณิตศาสตร์ 4.6 และ 4.7 โดยวิธีการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Nonlinear regression approach) ด้วยโปรแกรม OriginPro8 เพื่อเปรียบเทียบว่าตัวอย่างข้อมูลมีความสอดคล้องกับแลงก์เมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) หรือ ฟรุนดลิชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) มากกว่ากัน

ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.10 โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชมากกว่าแบบแลงเมียร์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R^2) ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสมการฟรุนดลิช มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับระหว่างกรดฮิวมิกและถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 มากกว่าสมการแบบแลงเมียร์



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับที่ได้จากข้อมูลการทดลองจริง กับแบบจำลองไอโซเทอมแล่งค์เมียร์และฟรูนคลิช

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่และตัวแปรของสมการไอโซเทอม

ตัวดูดซับ	แล่งค์เมียร์ไอโซเทอม			ฟรูนคลิชไอโซเทอม		
	R^2	q_{\max}	b	R^2	K	1/n
Filtrisorb200	0.9878	-9.315	-0.022	0.9965	1.721E-20	13.45

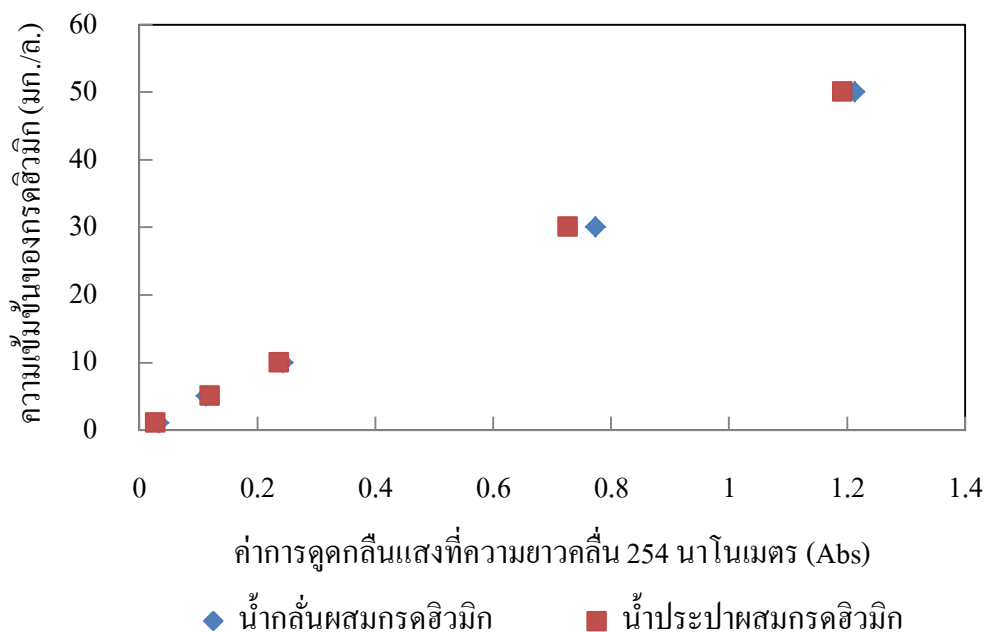
การที่ข้อมูลในการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรูนคลิชอธิบายได้ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) การดูดซับเป็นการดูดซับแบบกายภาพ (Physical adsorption) และเป็นการดูดซับแบบผันกลับได้ (Reversible adsorption) ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับไม่จำเพาะเจาะจง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีความอิสระที่จะจับหรือเกาะได้ทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดซับตรงบริเวณใดก็ได้ (อิสริยาภรณ์ บุญยืน, 2552) การเกาะเรียงตัวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นการเรียงตัวแบบหลายชั้น (Multi-layer formation) ด้วยลักษณะของสมการฟรูนคลิชมีลักษณะเป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) อธิบายได้ว่าโมเลกุลของกรดฮิวมิกมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ทราบเท่าที่มีการเพิ่มความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในสารละลาย

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ ($1/n$) ในสมการฟรุนดลิช จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่าเมื่อค่าของ $1/n$ มากกว่า 1 หมายถึงปริมาณของ active site บนพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากพอสำหรับการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามหากค่าของ $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณ active site มีปริมาณไม่พอสำหรับการดูดซับ ซึ่งในกรณีนี้ ค่า $1/n$ มีค่าเท่ากับ 13.45 แสดงว่าการดูดซับระหว่างกรดฮิวมิกและ Filtrasorb200 สามารถเกิดขึ้นได้ดี

4.2.9 การสังเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์โดยการใช้น้ำประปาแทนน้ำกลั่น

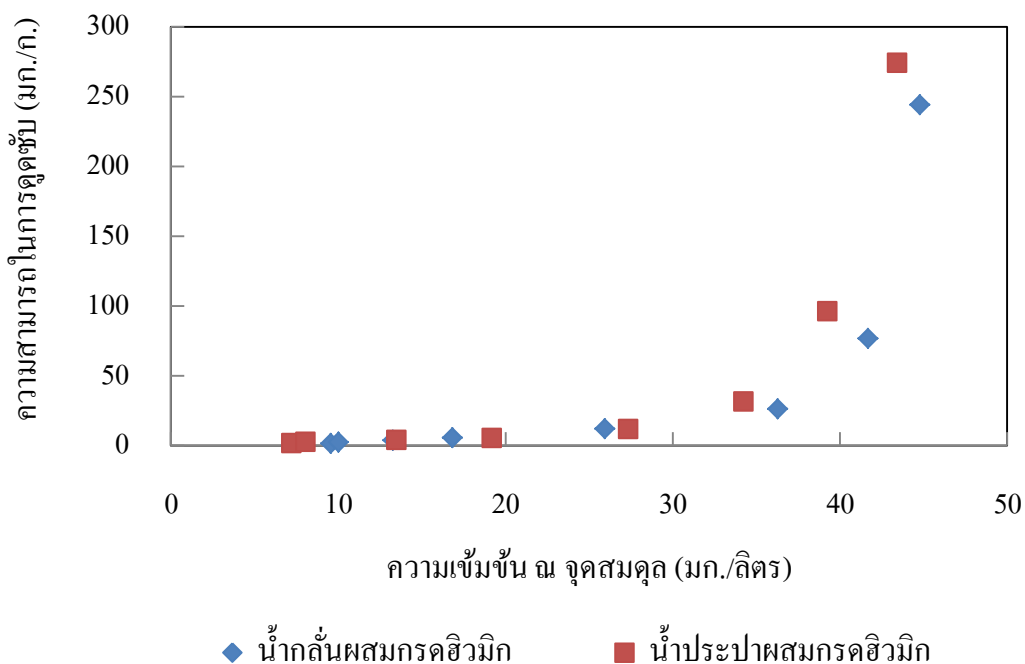
เนื่องจากการทดลองในลำดับถัดไปจะทำการทดลองใน โรงงานน้ำกรอง (Pilot-plant) ซึ่งจะต้องใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในปริมาณที่มาก น้ำกลั่นจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป แต่อย่างไรก็ตามการใช้น้ำประปาแทนน้ำกลั่นในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อาจทำให้ผลการทดลองเปลี่ยนไป เนื่องจากในน้ำประปานั้นอาจมีคลอรีนตกค้าง (Residual chlorine) ซึ่งตามมาตรฐานแล้วน้ำประปาจะต้องมีปริมาณคลอรีนตกค้างประมาณ 0.2-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอรีนตกค้างสามารถออกซิไดซ์กรดฮิวมิกให้เปลี่ยนรูปเป็นสารอื่นได้ ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง อีกทั้งน้ำประปายังประกอบไปด้วยไอออนของธาตุต่างๆ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบว่า การใช้น้ำประปาแทนน้ำกลั่นในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะส่งผลต่อสีของน้ำตัวอย่าง และความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์อย่างไร

การทดลองเริ่มต้นโดยการนำน้ำประปามาผสมกรดฮิวมิกเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกต่างๆตามที่ต้องการ หลังจากนั้นนำน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.11 จากผลการทดลองพบว่าน้ำเสียที่สังเคราะห์มาจากน้ำทั้งสองชนิดมีค่าการดูดกลืนแสงไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งแสดงว่าน้ำประปาที่นำมาใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณคลอรีนตกค้างน้อย ทำให้กรดฮิวมิกในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ได้ถูกออกซิไดส์ไป



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

ต่อมา นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำประปาและกรดฮิวมิกมาดูดซับ โดยผ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมช เป็นเวลา 1500 นาที โดยน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ได้ทำการคุมค่าพีเอชด้วยด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) แต่มีการทดลองวัดพีเอชในตัวอย่างทุกครั้ง และพบว่าพีเอชอยู่ในช่วง 6-7 หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับน้ำสังเคราะห์ที่ผสมจากน้ำกลั่นและกรดฮิวมิกที่ถูกปรับค่าพีเอชด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และจากการเปรียบเทียบดังภาพที่ 4.12 พบว่า ไม่สังเกตเห็นความแตกต่างมากนักระหว่างไอโซเทอมทั้งสองชนิด แสดงว่าไอออนในน้ำประปาไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ (ชุดิมา กัลยาประสิทธิ์, 2551) ดังนั้นการทดลองในขั้นต่อไปในโรงงานนำร่อง (Pilot-plant) จะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่สังเคราะห์จากน้ำประปาผสมกรดฮิวมิกในการทดลอง และไม่มีคามจำเป็นใดๆในการใช้สารเคมีในการปรับพีเอช



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซับในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด และไม่สังเกตพบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการดูดซับที่พีเอช 5,6,7 และ 8 การทดลองในงานวิจัยนี้สมการทางจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการอธิบาย คือ ปฏิกริยาอันดับสองเสมือนและไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ตามลำดับ การนำน้ำประปามาใช้แทนน้ำกลั่นในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ นอกจากนี้การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำประปาไม่มีความจำเป็นที่จะต้องคุมพีเอชด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) เพราะค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าวจะอยู่ในช่วงพีเอช 6 ถึง 7

4.3 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการแยกของไฮโดรไซโคลน

4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันจ่ายเข้าต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน (P_{inlet})

ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช ปริมาณ 150 กรัม ไล้ลงไปจนถึงที่มีน้ำประปา 300 ลิตร ในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกด้านล่างของตัวไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร เคนระบบที่ความดันจ่ายเข้า 0.5, 1, และ 2 บาร์ หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ที่เวลา 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ และนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) และคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.3) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.35 ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (2.35) ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100 \quad (4.8)$$

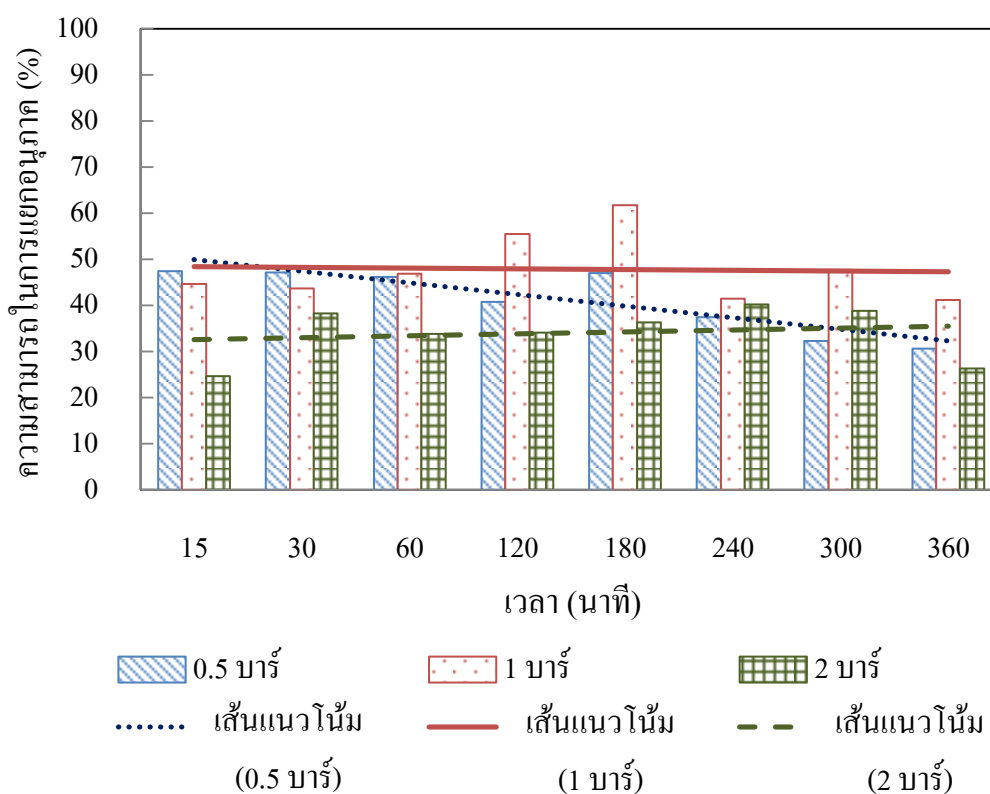
เมื่อ E'_T , E_T และ R_f คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลน ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน และอัตราส่วนการแบ่งการไหล (Flow split) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองสามารถอธิบายได้ 2 กรณี คือ

(1) เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 และ 1 บาร์ ผลการทดลองจะเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า เมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเปรียบได้กับการเพิ่มอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน โดยสามารถสังเกตความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากตารางที่ 4.4 และเมื่ออัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงก็จะสูงขึ้นเช่นกัน ($V_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$) ซึ่งส่งผลให้ความเร่งหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ($a_c = \frac{2V_y^2}{D_c}$) เนื่องจากความเร็วในการตกตะกอนของไฮโดรไซโคลน (U_T) ตามสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) คือ $U_T = \frac{a_c(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu}$ ดังนั้นจากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร่งหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้นความเร็วในการตกตะกอนก็จะ

เพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

(2) แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันจ่ายเข้า 1 และ 2 บาร์ จะเห็นว่าเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคกลับลดลง ผลการทดลองที่ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีนี้อาจเนื่องมาจากการที่เพิ่มความดันจ่ายเข้ามากเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคเกิดการแตกและเล็กลง เนื่องมาจากการเกิดแรงเฉือน (Shear-forces) และความปั่นป่วน (Turbulence) ที่มากเกินไปภายในไฮโดรไซโคลอน ดังนั้นตามสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) คือ $U_T = \frac{a_c(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu}$ จะเห็นว่าเมื่อขนาดของถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กลงความเร็วในการตกตะกอนก็จะน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนน้อยลงไปด้วย (Dwari และคณะ, 2004; Husveg และคณะ, 2007) ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ ในการดำเนินระบบ



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนที่ความดันจ่ายเข้าต่างกัน

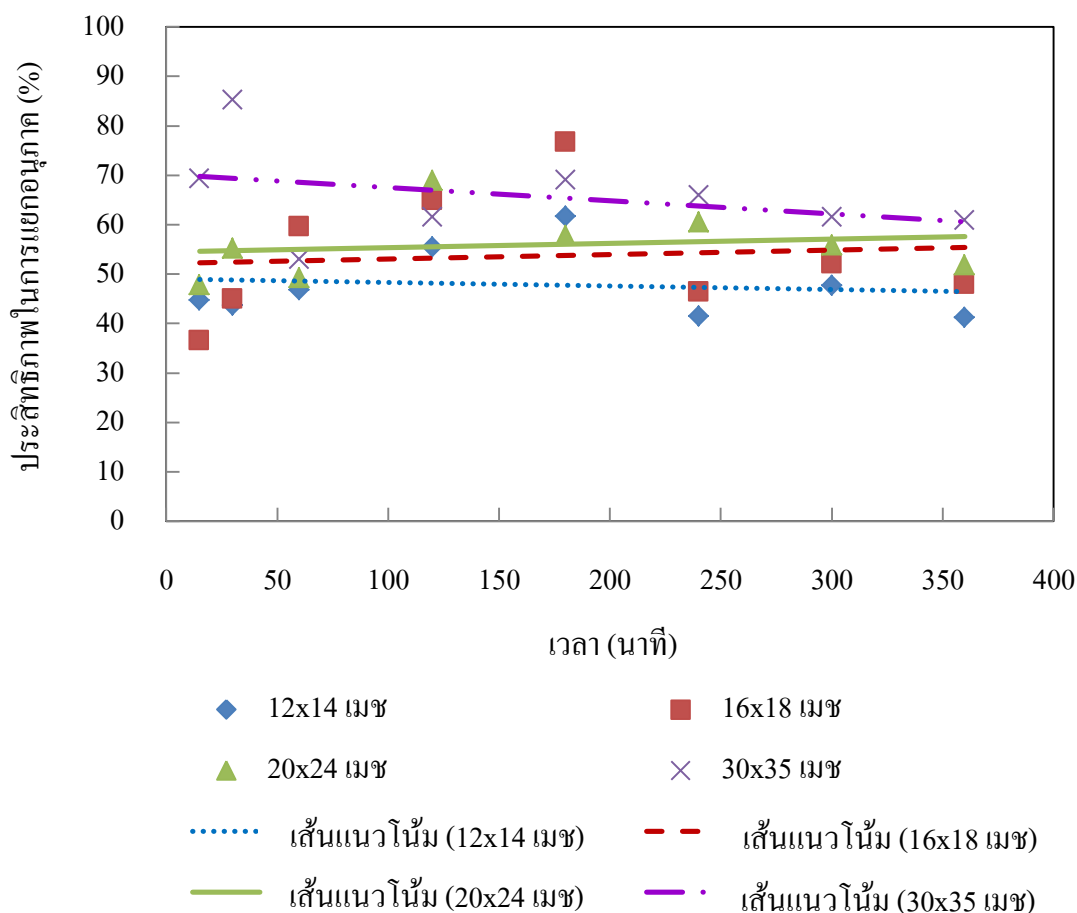
ตารางที่ 4.4 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกต่างๆของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าแตกต่างกัน

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล		
	ทางออกด้านล่าง (ลิตร/วินาที)	ทางออกด้านบน (ลิตร/วินาที)	ทางเข้าไฮโดรไซโคลน (ลิตร/วินาที)
0.5	0.051	0.551	0.602
1	0.064	0.716	0.781
2	0.076	1.181	1.257

4.3.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน (D_p)

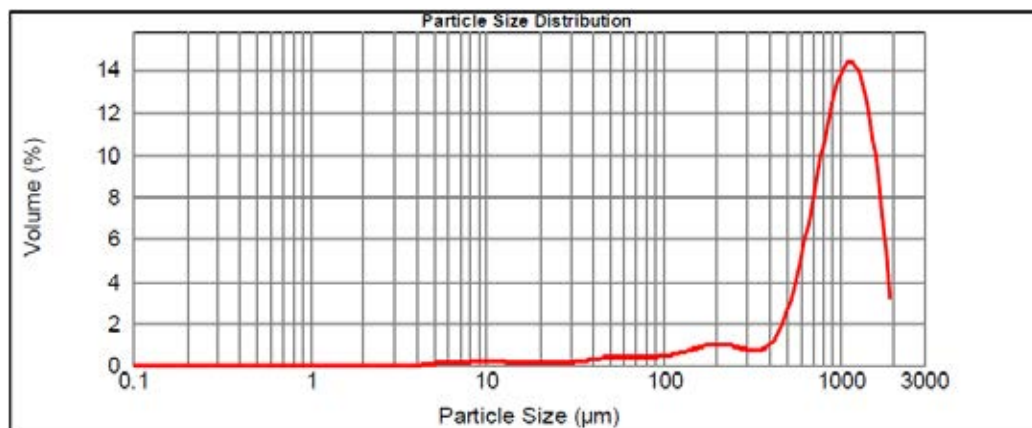
ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการศึกษาผลของความดันจ่ายเข้าต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน โดยเลือกใช้ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกด้านล่างของตัวไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ขนาดของถ่านกัมมันต์ 12x14, 16x18, 20x24 และ 30x35 เมช ตามลำดับ

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ที่มีแนวโน้มของประสิทธิภาพในการแยกสูงสุด คือ 30x35, 20x24, 16x18 และ 12x14 เมช ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการแยกอนุภาคก็จะลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ (1) อนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะชนกับใบพัดเครื่องสูบน้ำน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้อนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะแตกน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และ/หรือ (2) เนื่องจากงานวิจัยของ Husveg และคณะ (2007) ได้อธิบายไว้ว่าการแตกของอนุภาคเกิดจากแรงเฉือน (Shear force) ภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้น การที่อนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะแตกมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อาจเกิดจากการที่วัตถุที่มีขนาดใหญ่มีพื้นที่ในการรับแรงกระทำมากกว่าวัตถุขนาดเล็ก



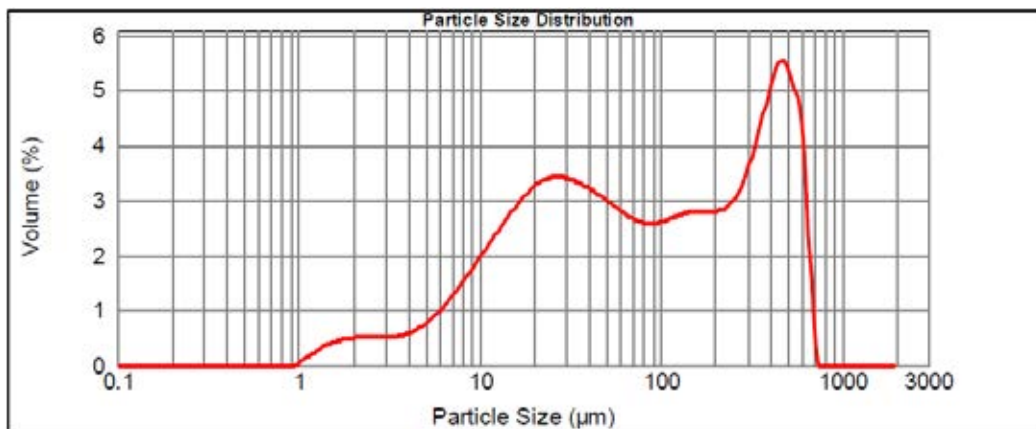
ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคตามเวลาที่เปลี่ยนไปจะพบว่า ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลนจะลดลงตลอดช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ทั้งนี้ก็เพราะการเดินระบบในการทดลองนี้เป็นการเดินระบบแบบทีละเท โดยน้ำประปาและถ่านกัมมันต์จะถูกหมุนเวียน (Circulate) ภายในระบบตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปถ่านกัมมันต์ก็จะมีขนาดเล็กลงดังภาพที่ 4.15 เนื่องจาก (1) เส้นทางการหมุนเวียนและระบบปั๊มที่ใช้ในการเดินระบบเป็นปั๊มน้ำแบบ Screw rotary displacement pump ทำให้ถ่านกัมมันต์เกิดการกระแทกกับใบพัดเครื่องสูบน้ำและแตกในระหว่างทางก่อนที่จะถูกจ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลน หรือ (2) แรงเฉือนและความปั่นป่วนภายในไฮโดรไซโคลน (Husveg และ คณะ, 2007) ดังนั้นตามสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) คือ $U_T = \frac{a_c(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กลงความเร็วในการตกตะกอนก็จะน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนน้อยลงไปด้วย



$D_{10} = 305.68$ ไมโครเมตร $D_{50} = 1004.74$ ไมโครเมตร $D_{90} = 1586.61$ ไมโครเมตร

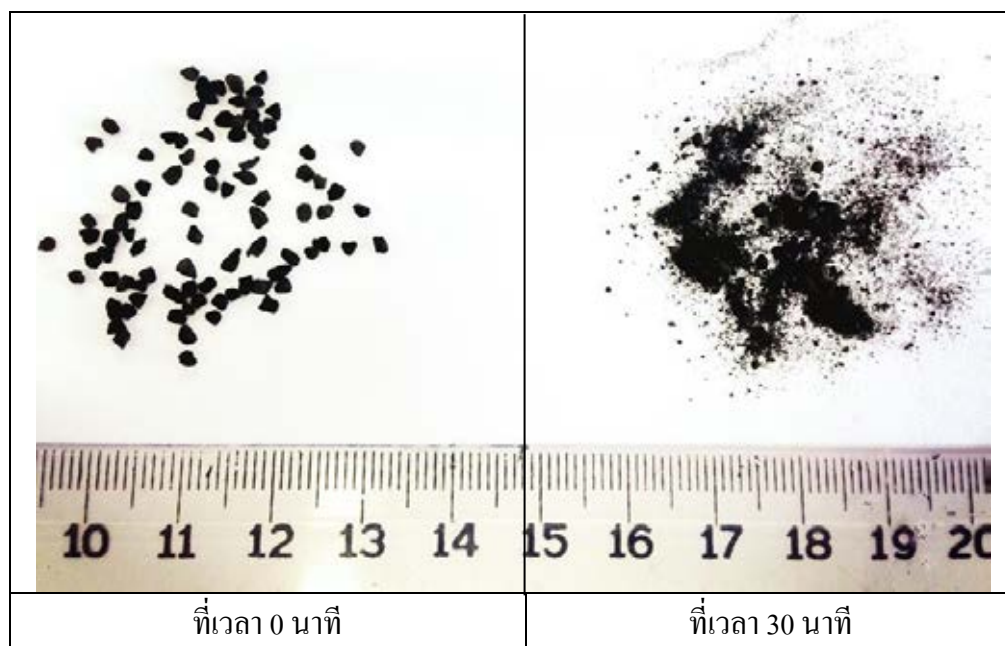
ก.



$D_{10} = 9.43$ ไมโครเมตร $D_{50} = 75.20$ ไมโครเมตร $D_{90} = 484.72$ ไมโครเมตร

ข.

(ต่อ)



ค.

- ภาพที่ 4.15 ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเดินระบบที่เวลาผ่านไป
 ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ ก.) ที่เวลา 0 นาที
 ข.) ที่เวลา 30 นาที
 ค.) ภาพถ่ายของถ่านกัมมันต์ที่ 0 และ 30 นาที

4.3.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (D_{90})

ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการศึกษาผลของความดันจ่ายเข้าต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ตามเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย และทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนจาก 9 เป็น 4 มิลลิเมตร

เนื่องจากจุดประสงค์ในการแยกของไฮโดรไซโคลนนั้นต้องการให้ส่วนทางออกด้านล่างมีแต่ปริมาณของของแข็งหรืออนุภาคทั้งหมดและมีเพียงน้ำใสในส่วนทางออกด้านบน แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้เพราะจะต้องมีส่วนของของเหลวออกมาที่ทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้นหากสามารถออกแบบให้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างเล็กลงจะทำให้น้ำใสไหลออก

ทางด้านล่างน้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในแง่ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงเล็กน้อยเท่านั้น (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

ดังนั้นการทดลองต่อมาจึงทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนจาก 9 เป็น 4 มิลลิเมตร และจากการทดลองพบว่า ความดันภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างที่ใช้มีขนาดเล็กเกินไปทำให้ถ่านกัมมันต์เกิดการอุดตันภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร มีความเสี่ยงต่อการอุดตันของถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ

4.3.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (D_c)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนที่จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ขนาด คือ 50 และ 75 มิลลิเมตร โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกกล่าวคือ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเล็กลงขนาดตัดของอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าไฮโดรไซโคลนจะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กได้ดีมากขึ้น จากการทำการทดลองในขั้นต้นที่ผ่านมาพบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ไม่ถึง 100% ดังที่คาดหวังไว้ ดังนั้นไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยเพราะจะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ของระบบลดน้อยลงอีก และเพื่อที่จะเห็นภาพการลดลงของประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำนายประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนขนาด 75 มิลลิเมตร โดยการคำนวณจากสมการที่ 4.9 - 4.11

$$\eta_{\text{mixed flow}} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi \times N_e \times V_y \times d_p^2 \times (\rho_p - \rho)}{9 \times \mu \times D_i}\right) \quad (4.9)$$

$$N_e = \frac{1}{D_i} \times \left(L_1 + \frac{L_2}{2}\right) \quad (4.10)$$

$$V_i = \frac{4Q}{\pi D_i^2} \quad (4.11)$$

หมายเหตุ ตามทฤษฎีแล้วความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอน (V_y) บริเวณผนังทางเข้าของไฮโดรไซโคลอน จะต้องเท่ากับความเร็วเข้าไฮโดรไซโคลอน (V_i) แต่ในความเป็นจริงจะเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วน ทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัสน้อยกว่าความเร็วเข้า แต่เพื่อความง่ายต่อการคำนวณ ในกรณีนี้จะสมมติว่าความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอนเท่ากับความเร็วเข้าไฮโดรไซโคลอน

โดย ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 (ρ_p) 2110 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น (ρ) และความหนืดเชิงจลศาสตร์ (μ) ของน้ำเท่ากับ 995.65 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.000798 นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการคำนวณของไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ไฮโดรไซโคลอน	
	ขนาด 50 มม.	ขนาด 75 มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า (D_i)	20	32
ความยาวส่วนทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลอน (L_1)	115	50
ความยาวส่วนกรวยของไฮโดรไซโคลอน (L_2)	260	350
จำนวนรอบที่ของไหลหมุนวนในไฮโดรไซโคลอน (N_c)	12.25	7.03

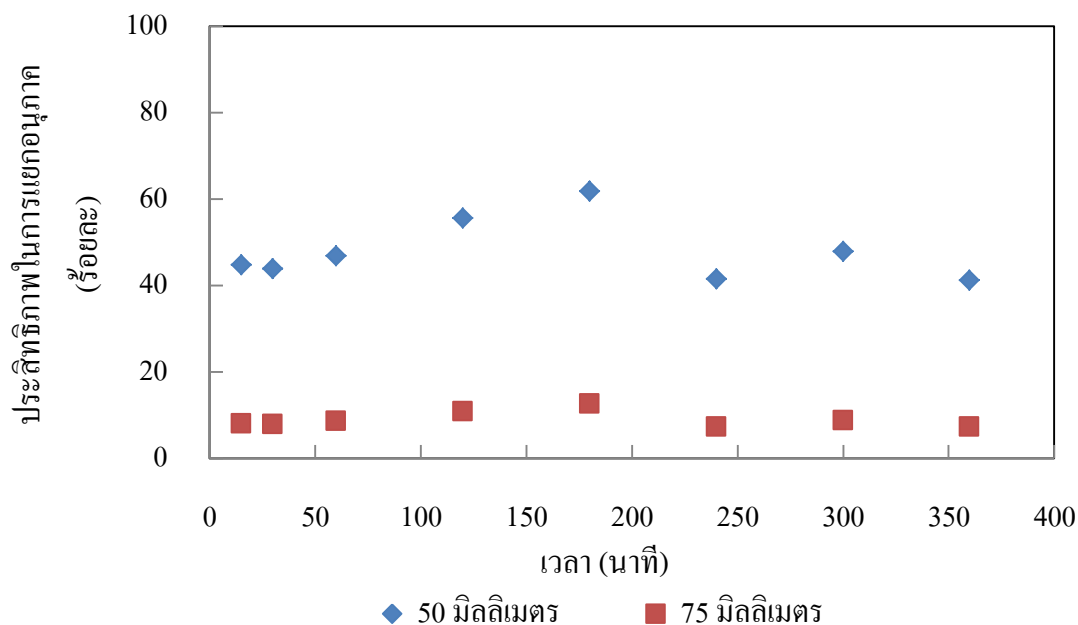
ขนาดที่ลดลงของอนุภาคถ่านกัมมันต์จะถูกคำนวณด้วยสมการที่ 4.9 - 4.11 โดยอาศัยข้อมูลผลการทดลองของไฮโดรไซโคลอนขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ไปทำนายประสิทธิภาพของการใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาด 75 มิลลิเมตรในการแยกถ่านกัมมันต์ที่เวลาต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เท่ากันไฮโดรไซโคลอนแต่ละขนาดส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอย่างไร ซึ่งข้อมูลผลการคำนวณถูกแสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.17 ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 7.17 ถึง 12.60 ซึ่งถือได้ว่ามีประสิทธิภาพการแยกที่น้อยมาก ดังนั้นไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ไม่เหมาะสำหรับนำมาแยกถ่านกัมมันต์ในกรณีนี้ เนื่องจากจะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ลดน้อยลงไปอีก

ตารางที่ 4.6 ค่าจากการคำนวณและทดลองของไฮโดรไฮโคลน 50 มิลลิเมตร ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์

ค่าจากการทดลอง			ค่าจากการคำนวณ
เวลา (นาทีก)	Q	$\eta_{\text{mixed flow}}$	D_p
	อัตราไหลจ่ายเข้า (ลิตรต่อวินาที)	ประสิทธิภาพในการแยก (ร้อยละ)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ไมโครเมตร)
15	0.79	44.68	28.08
30	0.81	43.72	27.33
60	0.74	46.82	29.97
120	0.75	55.53	33.72
180	0.75	61.74	36.71
240	0.74	41.48	27.60
300	0.78	47.73	29.58
360	0.81	41.19	26.29

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไฮโคลน 75 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์

เวลา (นาทีก)	Q	D_p	$\eta_{\text{mixed flow}}$
	อัตราไหลจ่ายเข้า (ลิตรต่อวินาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพในการแยก (%)
15	0.79	28.08	7.96
30	0.81	27.33	7.74
60	0.74	29.97	8.47
120	0.75	33.72	10.73
180	0.75	36.71	12.60
240	0.74	27.60	7.23
300	0.78	29.58	8.69
360	0.81	26.29	7.17



ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไซโคลนที่
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนต่างกัน

จากการทดลองที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 สูงสุด คือใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน 1 บาร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช

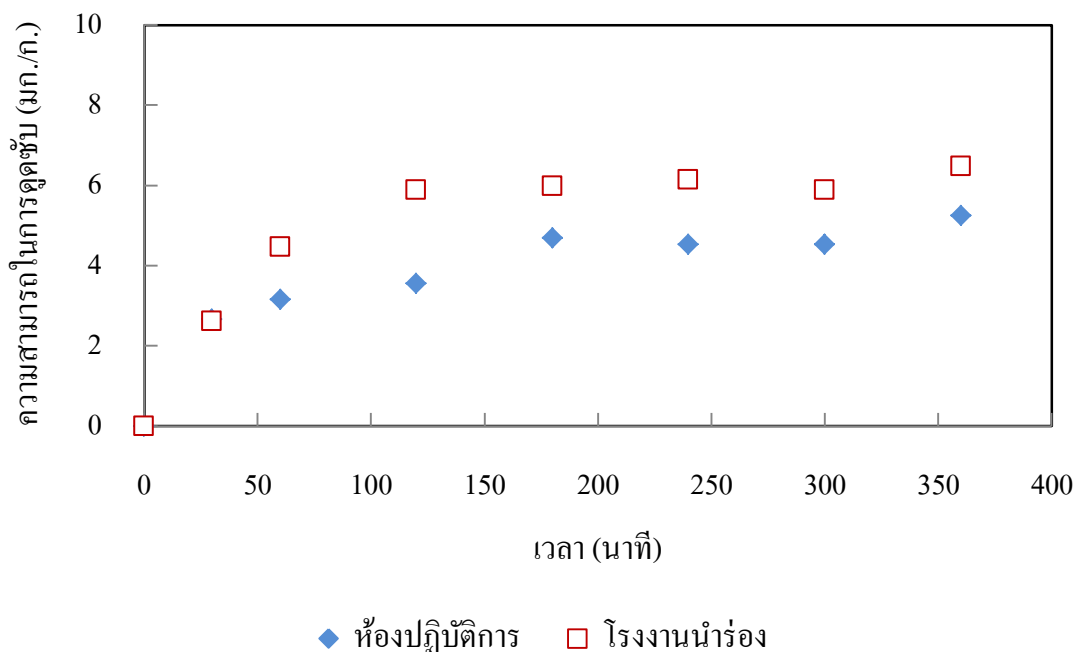
จะสามารถสังเกตได้ว่าการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช จะก่อให้เกิดผลดีต่อทั้งระบบการดูดซับและการแยกโดยไฮโดรไซโคลน แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองขั้นต่อไปจะต้องใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ปริมาณมากในการทำการทดลอง การคัดขนาดถ่านกัมมันต์จึงก่อให้เกิดความยุ่งยากต่อการทำงานวิจัย อีกทั้งการใช้งานถ่านกัมมันต์ในชีวิตจริงมักจะเป็นในลักษณะของการซื้อมาแล้วใช้งานเลยโดยที่ไม่ได้นำมาผ่านการคัดขนาดอีกครั้ง ดังนั้นเพื่อที่จะเลียนแบบการใช้งานถ่านกัมมันต์ในชีวิตจริงและลดความยุ่งยากในการทำงานวิจัย การทดลองในขั้นต่อไป จึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมชในการทำงานวิจัย

4.4 ผลการศึกษาการดูดซับในโรงงานนำร่องด้วยระบบที่ละเท (Batch experiment)

4.4.1 จลนศาสตร์การดูดซับภายในโรงงานนำร่อง

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับในโรงงานนำร่องด้วยระบบที่ละเท ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร และเดินระบบที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เริ่มการทดลองโดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ (น้ำประปาผสมกรดฮิวมิก) 300 ลิตร ที่ระดับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ หลังจากนั้นทำการเติมถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมช ปริมาณ 150 กรัม ลงไปในถังที่เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไว้ แล้วเดินระบบไฮโดรไซโคลน และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางออกด้านบน (Overflow) ที่เวลา 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (C) ที่เวลาต่างๆ โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เช่นเดียวกับการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ

เมื่อนำผลของจลนศาสตร์การดูดซับที่ทำในห้องปฏิบัติการและใน โรงงานนำร่องมาเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 4.17 จะสังเกตเห็นได้ว่าอัตราเร็วของการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ในโรงงานนำร่องมีค่าที่ค่อนข้างจะสูงกว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ และเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาอัตราเร็วในการดูดซับตามสมการจลนศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนตามตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่า $k_2 q_c^2$ ของการดูดซับกรดฮิวมิกโดยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในโรงงานนำร่องมีค่าเท่ากับ 0.189 (มก./ก.*นาที) ส่วนค่า $k_2 q_c^2$ ในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 0.123 (มก./ก.*นาที) ซึ่งค่า $k_2 q_c^2$ แสดงถึง ปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ 1 กรัม ในเวลา 1 นาที ซึ่งค่า $k_2 q_c^2$ ในโรงงานนำร่องมีค่าสูงกว่าในห้องปฏิบัติการ แสดงว่า อัตราเร็วในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ในโรงงานนำร่องสูงกว่าในห้องปฏิบัติการ (ปรานค์ศิริ ศรีสุภพัชร, 2551) ทั้งนี้เป็นเพราะอุณหภูมิในโรงงานนำร่องจะเป็นไปตามสภาวะแวดล้อม ซึ่งโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 30 ± 1 องศาเซลเซียส และเพิ่มสูงขึ้นเป็น 35 ± 1 องศาเซลเซียส เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดจากความร้อนของเครื่องสูบน้ำที่ทำงานเป็นระยะเวลานาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในโรงงานนำร่องจะสูงกว่าในห้องปฏิบัติการ (25 ± 1 องศาเซลเซียส) การที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้นด้วย เนื่องจาก อัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิไม่ว่าการดูดซับนั้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน



ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในโรงงานนาร่องที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาอันดับสอง

	q_{exp} (มก./ก.)	q_c (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.*นาที)	$k_2 q_c^2$ (มก./ก.*นาที)	R^2
ห้องปฏิบัติการ	6.58	5.56	0.0040	0.123	0.98
โรงงานนาร่อง	6.48	7.14	0.0037	0.189	0.99

4.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับภายในโรงงานนาร่อง

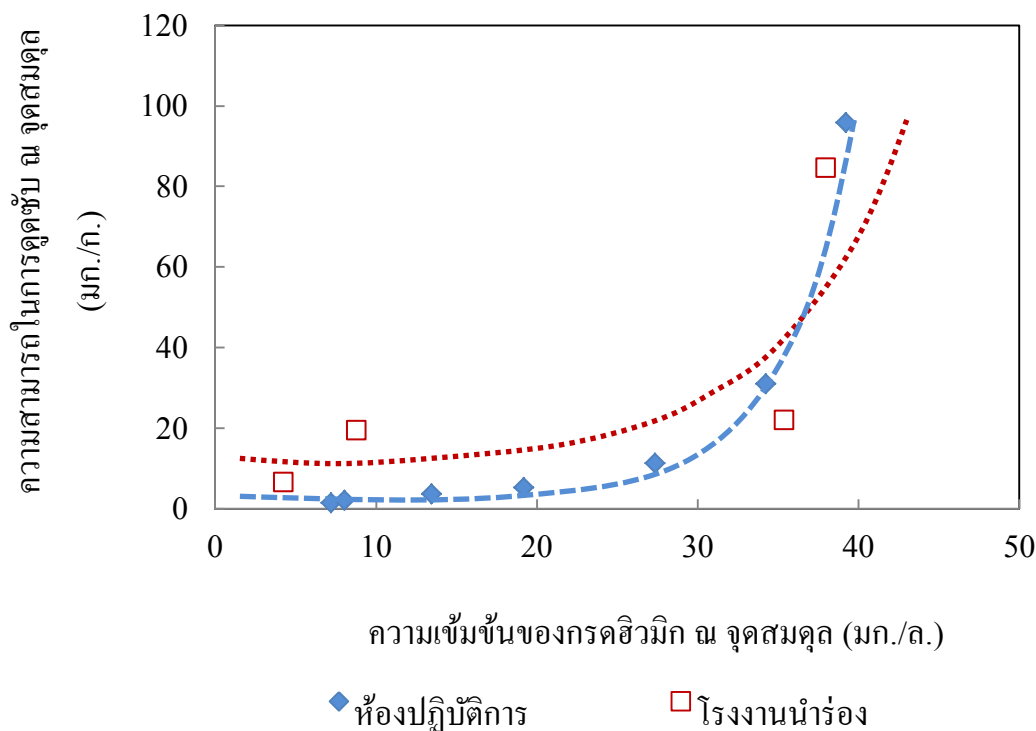
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในโรงงานนาร่องด้วยการเดินระบบที่ละเท ทำโดยอาศัยข้อมูลของจลนศาสตร์การดูดซับโดยเลือกใช้ที่เวลาในการดูดซับ 360 นาที สภาวะที่นำมาใช้มี 4 ค่า คือ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1, 0.5 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่กราฟไอโซเทอมการดูดซับ ตามภาพที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับกรดฮิวมิก ระหว่างการดูดซับในห้องปฏิบัติการและในโรงงานนำร่องมีความแตกต่างกันไม่มากนัก โดยบางค่าจะพบว่าความสามารถในการดูดซับในห้องปฏิบัติการสูงกว่าใน โรงงานนำร่อง แต่บางครั้งผลการทดลองกลับตรงกันข้ามทั้งนี้อาจเป็นเพราะปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

ปัจจัยที่ทำให้การดูดซับใน โรงงานนำร่องและห้องปฏิบัติการมีความแตกต่างกัน คือ

(1) อุณหภูมิ: การดูดซับในห้องปฏิบัติการจะถูกคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิในโรงงานนำร่องจะเป็นไปตามสภาวะแวดล้อม คือ 30 ± 1 องศาเซลเซียส และเมื่อเดินระบบไฮโดรไซโคลนเป็นเวลา 360 นาที อุณหภูมิของระบบจะเพิ่มสูงถึง 35 ± 1 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นเกิดจากการเดินระบบเครื่องสูบน้ำเป็นเวลานาน จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าการดูดซับของกรดฮิวมิกและถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb200 ในงานวิจัยนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และเป็นการดูดซับแบบผันกลับได้ (Reversible adsorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีพลังงานในการสั่น (Vibrational energy) เพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานดังกล่าวจะทำให้โมเลกุลของกรดฮิวมิกมีแนวโน้มที่จะเกิดการคายซับ (Desorption) ออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ ดังนั้นในความเป็นจริงแล้วความสามารถในการดูดซับที่เกิดใน โรงงานนำร่องน่าจะน้อยกว่าในห้องปฏิบัติการ

(2) การแตกของตัวดูดซับ: เนื่องจากกรดฮิวมิกมีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้กรดฮิวมิกไม่สามารถถูกดูดซับภายในรูพรุนที่ลึกลงไปเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นคอขวด (Ink-well หรือ Bottle neck) ดังนั้นการแตกของถ่านกัมมันต์อาจจะก่อให้เกิดผลดีต่อความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากการแตกจะทำให้เกิดการเปิดออกมาของโครงสร้างคอขวด แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับระหว่างกรดฮิวมิกและถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพที่ไม่มีความแข็งแรงมากนัก ดังนั้นเมื่อถ่านกัมมันต์เกิดการแตกอาจจะทำให้กรดฮิวมิกหลุดออกมาซึ่งส่งผลเสียต่อความสามารถในการดูดซับ



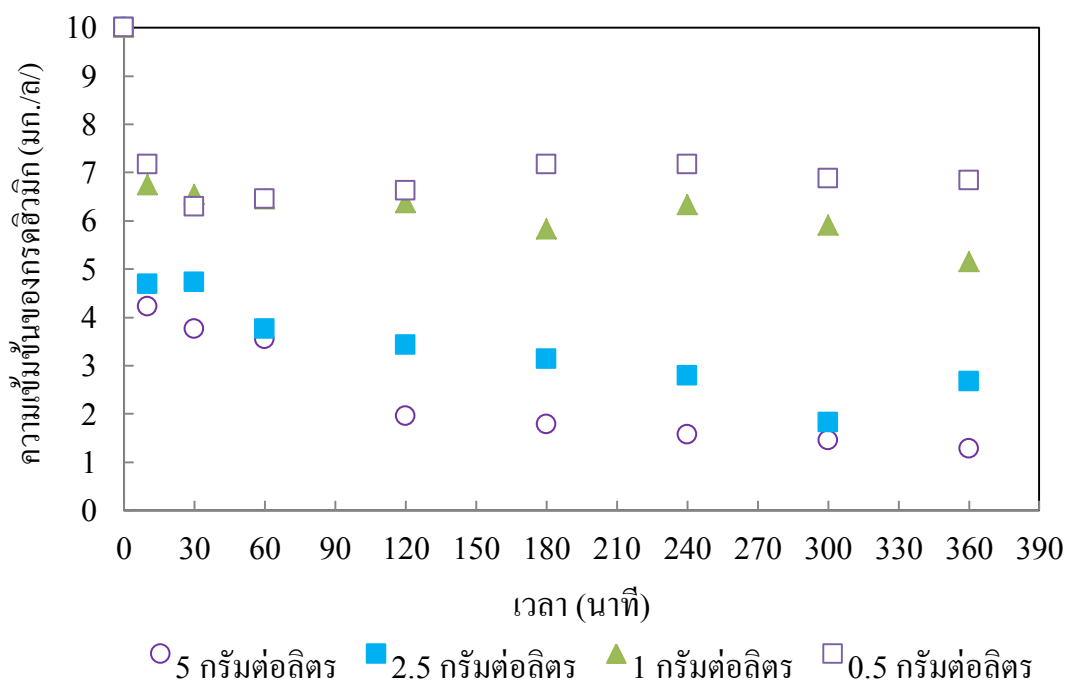
ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในโรงงานนำร่อง

4.5 ผลการศึกษาการดูดซับใน pilot plant แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous)

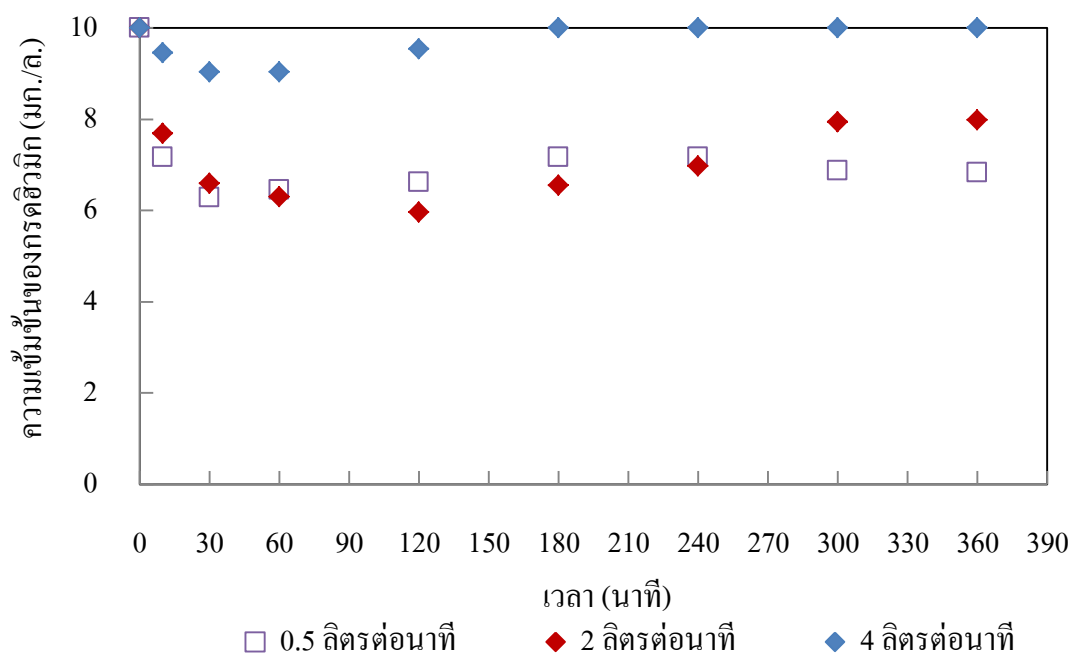
แนวคิดในการทดลองมาจากการดูดซับแบบคอลัมน์ (Column adsorption) โดยการใส่ตัวดูดซับปริมาณหนึ่งในระบบ (mass) แล้วให้น้ำเสียสังเคราะห์ไหลเข้าระบบด้วยอัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งอย่างต่อเนื่อง ผลที่จะได้คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด (C_t) และปริมาตร (V) หรือระยะเวลาในการเดินระบบ (t) ซึ่งกราฟดังกล่าวเรียกว่า กราฟเบรกทูร์ (Breakthrough curve) โดยจุดที่มีความสำคัญบนกราฟมีอยู่ 2 จุด คือ (1.) T_b (Breakpoint time) คือ จุดเวลาบนกราฟเบรกทูร์ที่ความเข้มข้นขาออกของน้ำที่บำบัดแล้ว เท่ากับความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยภายในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของสารละลายกรดอิวมิกในน้ำที่บำบัดแล้ว เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากกรดอิวมิกจะก่อให้เกิดสีในน้ำเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Maghsoodloo และคณะ, 2011) เวลาดังกล่าวที่อ่านได้จากกราฟจะถือเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกักตัวดูดซับในระบบ (SRT) เมื่อทราบ SRT ก็จะประมาณอัตราการไหลของตัวดูดซับที่เหมาะสมได้ ($L_s = \text{mass}/\text{SRT}$) (2.) T_e (Exhaustion time) คือ จุดเวลาบนกราฟเบรกทูร์ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่ตัวกลางดูดซับไม่มีความสามารถใน

การดูดซับกรดฮิวมิกได้อีกต่อไป ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อทราบค่า T_E จะทำให้สามารถประมาณความสามารถของตัวดูดซับได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟเบรกทรู

การทดลองเริ่มต้นโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์กรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที และปริมาณตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการเดินระบบ 360 นาที โดยความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ ณ เวลาใดๆ จะถูกเก็บที่ทางออกด้านบน (Overflow) จากภาพที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร สามารถดูดซับกรดฮิวมิกให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ แต่ยังไม่สามารถสังเกตเห็นทั้งจุด T_B และจุด T_E บนเส้นกราฟได้ ดังนั้นในการทดลองต่อมาจึงทำการลดปริมาณตัวกลางดูดซับลงเป็น 2.5, 1, และ 0.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ายังไม่สามารถสังเกตเห็นจุด T_B และ T_E บนกราฟผลการทดลอง แม้จะทำการลดปริมาณตัวกลางดูดซับลงแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์จาก 0.5 ลิตรต่อนาที เป็น 2 และ 4 ลิตรต่อนาที เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ตัวกลางดูดซับรับภาระในการดูดซับเพิ่มขึ้นในเวลาที่เท่ากัน และอาจจะทำให้สามารถสังเกตเห็น จุด T_B และ T_E ได้ภายในระยะเวลาที่ดำเนินการทดลอง 360 นาที ผลการทดลองในกรณีดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.19 กราฟเบรกทรู ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที และปริมาณตัวดูดซับต่างกัน



ภาพที่ 4.20 กราฟเบรคทรู ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของน้ำเสียต่างกัน

4.5.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและระยะเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดต่อระบบไฮบริด

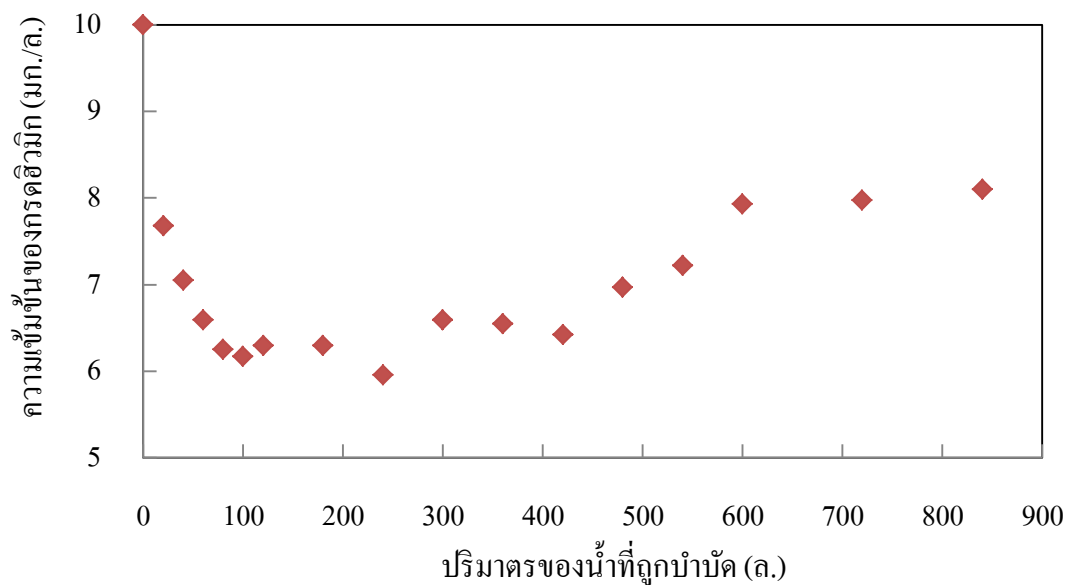
อิทธิพลของปริมาณตัวกลางดูดซับที่ส่งผลต่อระบบไฮบริดสามารถสังเกตได้จาก ภาพที่ 4.19 เมื่อปริมาณตัวกลางดูดซับลดลงประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบก็จะลดลงด้วย และที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที จะต้องใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับมากกว่า 2.5 กรัมต่อลิตร จึงจะสามารถดูดซับกรดฮิวมิกให้มีความเข้มข้นเหลือน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้

ส่วนอิทธิพลของระยะเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ส่งผลต่อระบบไฮบริดสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.20 โดยในช่วงแรกน้ำเสียที่ออกมาจากการบำบัดยังคงมีความเข้มข้นสูงอยู่เนื่องจากเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับยังไม่เพียงพอ หลังจากนั้นความเข้มข้นของน้ำเสียจะค่อยๆลดลงและคงที่ เพราะตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีเวลาสัมผัสกันอย่างเพียงพอ และตัวดูดซับยังมีพื้นที่ผิวมากพอสำหรับการดูดซับกรดฮิวมิก แต่หลังจากนั้นความเข้มข้นของน้ำขาออกจะค่อยๆเพิ่มขึ้น (เนื่องจากการใช้งานตัวดูดซับจนถึงสมดุลทำให้ตัวดูดซับไม่สามารถกักจับตัวถูกดูดซับได้อีกต่อไป) จนกระทั่งความเข้มข้นขาเข้าเท่ากับความเข้มข้นขาออก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับได้อีกต่อไป (Exhaustion time, T_E)

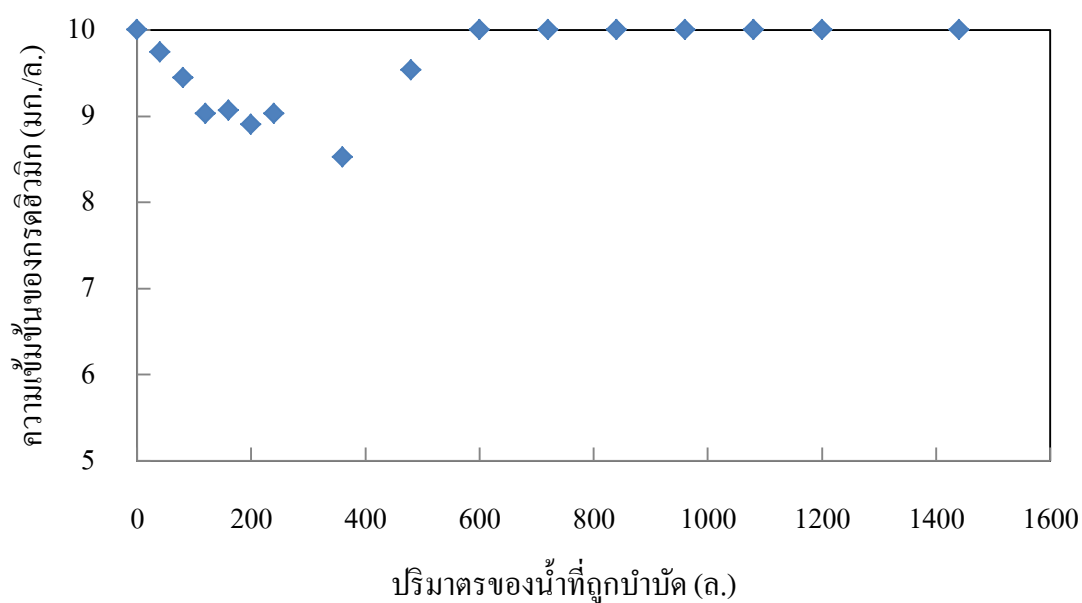
4.5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด (Q) ต่อระบบไฮบริด จากภาพที่ 4.20 พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์จาก 0.5 เป็น 2 ลิตรต่อนาที จะทำให้สามารถสังเกตจุด T_E ได้เท่ากับ 300 นาที จากกราฟเบรกทู แต่ไม่สามารถสังเกตพบจุด T_B เนื่องจากที่ปริมาณตัวกลางดูดซับและอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าวไม่สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำให้เหลือน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ และเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 4 ลิตรต่อนาที จะพบว่าเวลาที่ตัวกลางดูดซับจะหมดประสิทธิภาพในการดูดซับจะเร็วขึ้นโดย T_E ที่อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เท่ากับ 150 นาที ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบจะลดลง

4.5.3 การประมาณค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกราฟเบรกทู

เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 10 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ในการดูดซับกรดฮิวมิก สามารถประมาณได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟภาพที่ 4.21 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัด (Effluent concentration) และปริมาตรน้ำที่ถูกบำบัด ($V=Q/t$) และผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.10 โดยสามารถสังเกตได้ว่า ค่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกที่คำนวณได้จากกราฟ 4.21 (ก.) เท่ากับ 7.40 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนที่คำนวณได้จากกราฟ 4.21 (ข.) เท่ากับ 5.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันกับค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่คำนวณได้จากการทดลองการดูดซับแบบทีละเทินในห้องปฏิบัติการ และในโรงงานนำร่องซึ่งเท่ากับ 6.58 และ 6.48 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ยืนยันได้ว่าไฮโดรไซโคลนมีความสามารถในการแยกและนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 4.21 กราฟเบรกทรู ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดคลอโรฟิลล์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร

- (ก.) อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ลิตรต่อนาที
- (ข.) อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 4 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.9 ค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จากการเดินระบบแบบต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัมต่อลิตร

	รูปแบบการเดินระบบ	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	หมายเหตุ
ห้องปฏิบัติการ	ระบบทีละเท	6.58	-
โรงงานนําร่อง	ระบบทีละเท	6.48	-
	ระบบกึ่งต่อเนื่อง	7.40	พ.ท. ได้กราฟ 4.21 (ก.)
	ระบบกึ่งต่อเนื่อง	5.00	พ.ท. ได้กราฟ 4.21 (ข.)

จากผลการทดลองที่ 4.5 สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบไฮบริดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางดูดซับ และ/หรือลดอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ไม่สามารถหาอัตราการไหลของตัวดูดซับที่เหมาะสม ($L_s = \text{mass/SRT}$) สำหรับอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ ได้จากการทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous)

ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะทำการแปลงค่า (varied) อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับการกำจัดกรดฮิวมิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์คงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นเมื่อทั้งตัวกลางดูดซับและน้ำเสียสังเคราะห์มีการไหลในระบบอย่างต่อเนื่องจะเรียกระบบดังกล่าวว่า ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor)

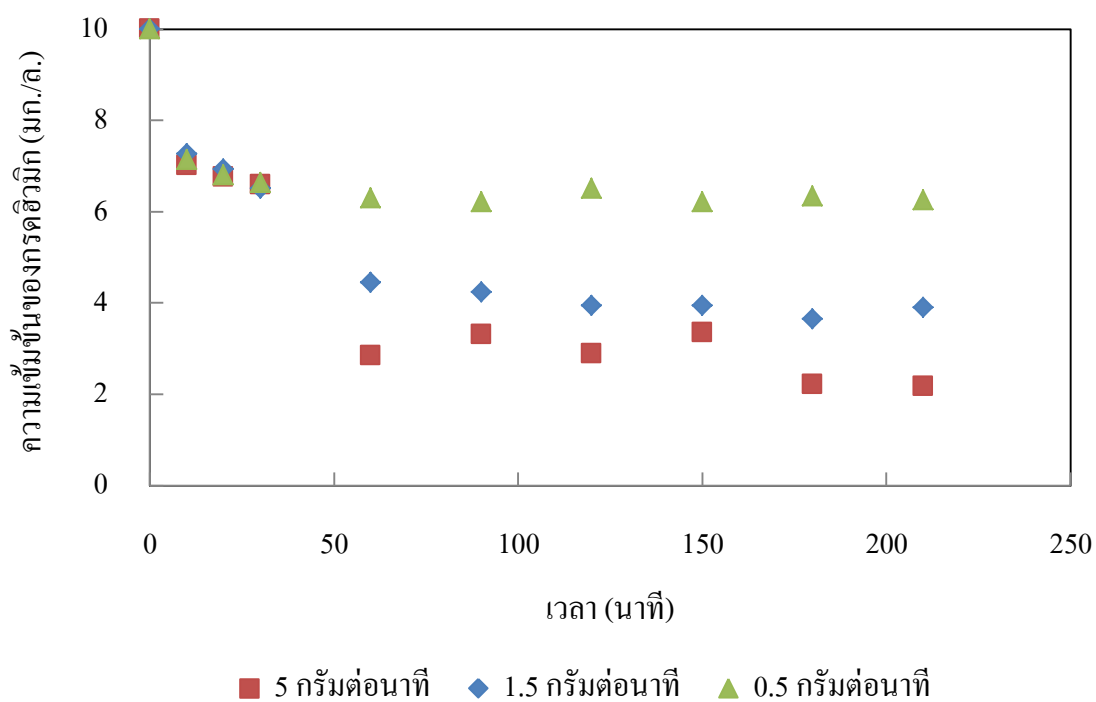
4.6 ผลการศึกษาการดูดซับในโรงงานนําร่องแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor)

4.6.1 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการนําระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดซึ่งเดินระบบแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง ในการกำจัดกรดฮิวมิก

ทำการทดลองโดยการใส่ปริมาณถ่านกัมมันต์ เริ่มต้น 500 กรัม ลงในถังที่มีน้ำเสียสังเคราะห์ 200 ลิตร ที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที หลังจากปล่อยให้ระบบดำเนินไป 30 นาที จึงทำการป้อนถ่านกัมมันต์ด้วยอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ 0.5, 1.5, และ 5 กรัมต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

ที่ทางออกด้านบน (Overflow) ที่เวลา 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180 และ 210 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (C_t) โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

จากการทดลองภาพที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าระบบไฮบริดไฮโดรไลซิโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดซึ่งเดินระบบแบบถึงปฏิกรณ์แบบถึงกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) สามารถนำไปใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิกได้ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ (L_s) ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยต้องการอัตราการไหลตัวกลางดูดซับมากกว่า 1.5 กรัมต่อนาที ถึงจะบำบัดน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้นของกรดฮิวมิกน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.22 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับต่างกัน

4.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับของระบบไฮบริดไฮโดรไลโซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดซึ่งเดินระบบแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.6.1 โดยใช้อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ 0.5, 1.5, และ 5 กรัมต่อนาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ 0.2, 0.5, และ 1.5 กรัมต่อนาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางออกด้านบน (Overflow) ที่เวลา 210 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮิวมิก ณ เวลาสมดุล (C_e) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และทำการคำนวณความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิก (q_e) ของถ่านกัมมันต์จากสมการที่ 4.12 ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตาราง 4.10

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times Q}{L_s} \quad (4.12)$$

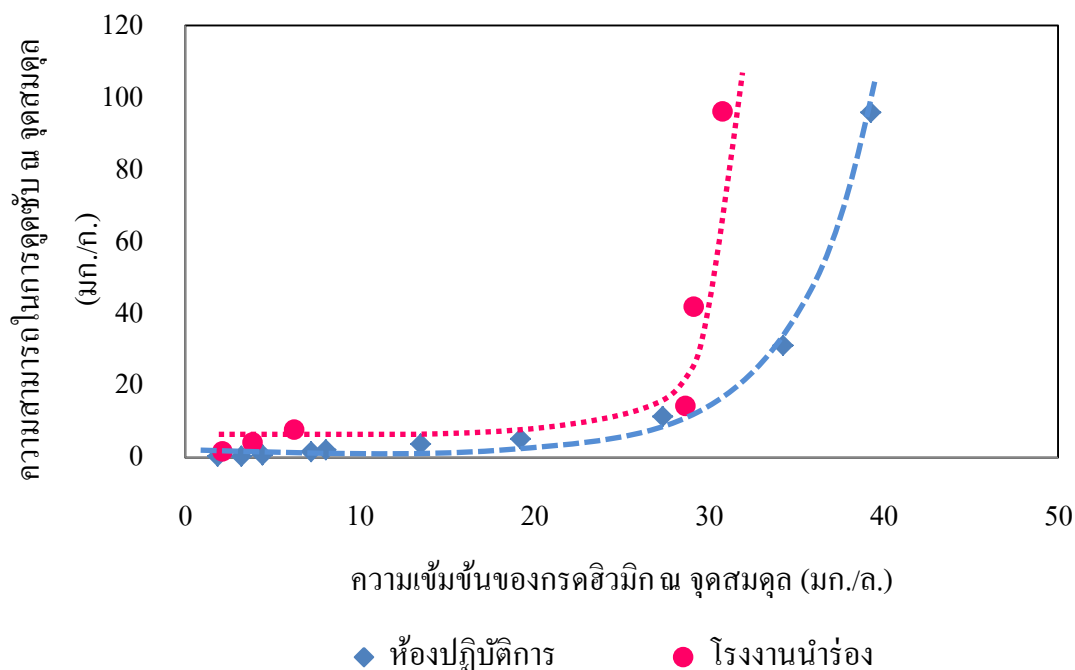
โดย Q คือ อัตราการไหลของเฟสที่ต้องการบำบัด (ล./นาที)
 L_s คือ อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ (ก./นาที)

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_o) (มก./ล.)	อัตราการไหลของตัวดูดซับ (L_s) (ก./นาที)	ความเข้มข้น ณ สมดุล (C_e) (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (q_e) (มก./ก.)
10	0.5	6.25	7.50
	1.5	3.90	4.07
	5	2.17	1.57
50	0.2	30.81	95.95
	0.5	29.17	41.66
	1.5	28.67	14.22

จากภาพที่ 4.23 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอมการดูดซับในห้องปฏิบัติการและการเดินระบบไฮบริดแบบต่อเนื่อง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับของระบบไฮบริดมีค่าสูงกว่าในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวอาจเป็นเพราะในการทดลองระบบไฮบริด มีการใส่ตัวกลางดูดซับ 500 กรัม ในการทดลองเริ่มต้นทุกครั้ง อย่างไรก็ตาม

โดยรวมแล้วกราฟทั้งสองมีทิศทางในทางเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา



ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในโรงงานนำร่องที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง

4.7 การนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบไฮบริดเบื้องต้น

4.7.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบสามารถประมาณได้จากการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method)

เนื่องจากสมการสมดุลมวล (Mass balance) ของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบถังปฏิกรณ์แบบถ่วงต่อเนื่อง คือ

$$L_s(q_e - q_1) = Q(C_0 - C_f) \quad (4.13)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูป
$$\frac{L_s}{Q} = \frac{(C_0 - C_f)}{(q_e - q_1)} \quad (4.14)$$

แนวทางการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method)

(1.) นำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_c (แกน Y) และ q_c (แกน X) ดังภาพที่ 4.24 ซึ่งเส้นกราฟที่ได้ เรียกว่า เส้นสมดุลของระบบ (Equilibrium line)

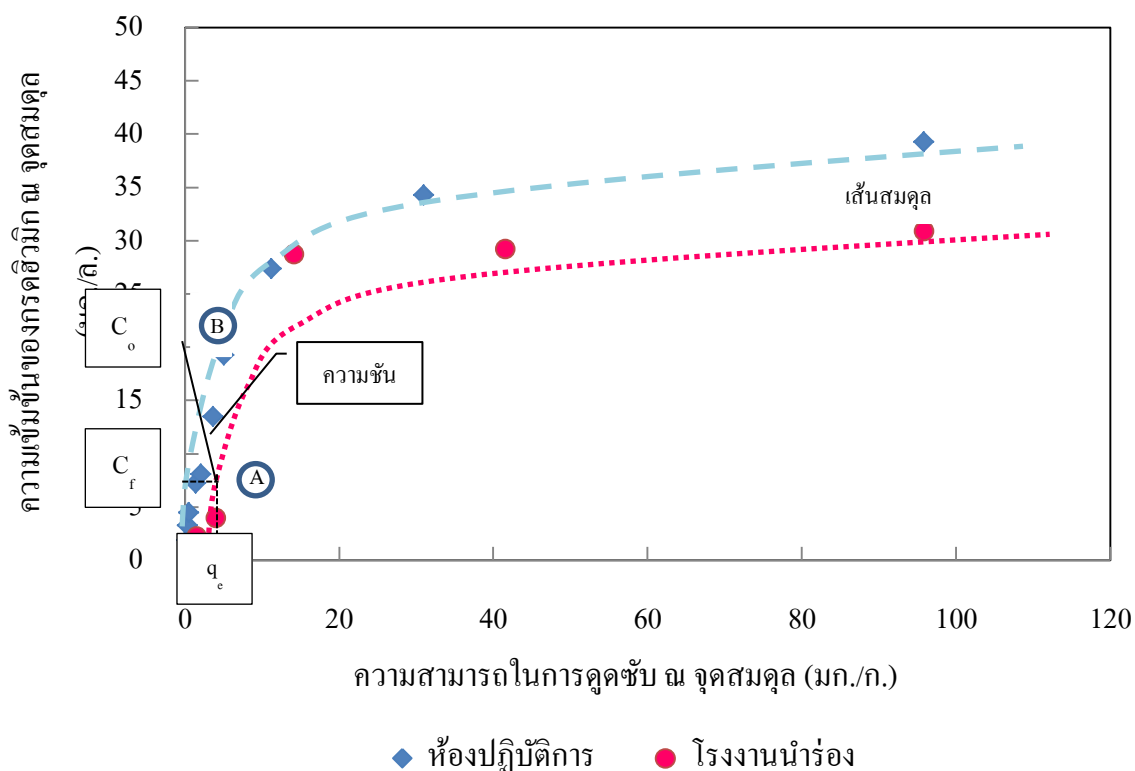
(2.) หาจุด A โดยการกำหนดจุดความเข้มข้นสุดท้ายที่ต้องการให้ระบบบำบัดเหลือ (C_p) บนแกน Y และลากจากจุดดังกล่าวขนานกับแกน X มาชนกับเส้นสมดุลของระบบ ซึ่งจะสามารถอ่านค่า q_c ได้จากแกน X

(3.) เนื่องจากต้องการให้ระบบเกิดประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด จึงมักกำหนดให้ q_1 เท่ากับ 0 เพราะค่า q_1 คือ ความสามารถในการดูดซับของสารตัวกลาง ณ จุดที่ออกจากระบบ

(4.) หาจุด B โดยการกำหนดจุดความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก (C_0) บนแกน Y และเนื่องจากกำหนดให้ค่า q_1 เท่ากับ 0 จุดดังกล่าวจึงยังคงอยู่บนแนวแกน Y

(5.) ลากเส้นความชันได้จากจุด A (q_c, C_p) และ B (q_1, C_0) และเมื่อสังเกตจากสมการ 4.14 จะทราบว่า ค่าความชันดังกล่าว คือ ค่า L_s/Q

(6.) ดังนั้นเมื่อทราบอัตราการไหลของน้ำเสีย (Q) ก็จะประมาณอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับได้ (L_s)



ภาพที่ 4.24 การวิเคราะห์กระบวนการดูดซับโดยวิธีทางกราฟ (Graphical method)

ประโยชน์ของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง คือ การคำนวณและการออกแบบระบบสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method) ซึ่งมีความสะดวกอย่างมากต่อการคำนวณและออกแบบระบบ เพราะเมื่อสภาวะในการเดินระบบเปลี่ยนไป ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราการไหลของน้ำเสีย และอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ ที่ใช้ในการเดินระบบสามารถประมาณได้จากกราฟไอโซเทอมของระบบ

ยกตัวอย่างเช่นน้ำประปามีความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องการบำบัดให้เหลือความเข้มข้นของกรดฮิวมิก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสมมติว่าต้องการออกแบบให้อัตราไหลของน้ำเสียเท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที จะต้องใช้อัตราไหลของตัวกลางดูดซับเท่าไร

จากกราฟที่ 4.24 จะสามารถประมาณได้ว่าที่ C_f เท่ากับ 5 มก./ล. มีค่า q_c เท่ากับ 5 มก./ก. ดังนั้น ค่าความชันของกราฟ หรือ ค่า L_s/Q เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตร และเมื่อต้องการให้อัตราการไหลของน้ำเสีย เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที จะได้ว่าอัตราการไหลของตัวดูดซับที่ต้องการเท่ากับ 60 กรัมต่อนาที

4.7.2 การประเมินพื้นที่ที่ใช้สำหรับการแยกโดยไฮโดรไซโคลนเปรียบเทียบกับการตกตะกอนแบบธรรมดา

การแยกโดยใช้ไฮโดรไซโคลน

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าที่ความดันจ่ายเข้า 0.5, 1 และ 2 บาร์ อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 0.602, 0.781 และ 1.257 ตามลำดับ เมื่อทราบอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียสังเคราะห์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคถ่านกัมมันต์ (โดยสมมติว่าไม่ได้เกิดการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ในระบบ) จะสามารถคำนวณค่าความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคอันเนื่องมาจากความเร่งสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal settling velocity) ได้จากสมการที่ 4.15 และจะสามารถประมาณประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนได้จากสมการที่ 4.16

$$U_T = \frac{2 \times V_c^2}{D_c} \times \frac{(\rho_p - \rho) \times D_p^2}{18 \times \mu} \quad (4.15)$$

$$\eta_{\text{mixed flow}} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi \times N_e \times V_y \times d_p^2 \times (\rho_p - \rho)}{9 \times \mu \times D_i}\right) \quad (4.16)$$

โดย U_T คือ ความเร็วสุดท้ายในการแยกของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน (ชม./วินาที)

โดย ขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช (D_{50}) 1004.736 ไมโครเมตร ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ (ρ_p) 2110 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น (ρ) และความหนืดเชิงจลศาสตร์ (μ) ของน้ำเท่ากับ 995.65 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.000798 นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 แสดงข้อมูลผลการคำนวณหาความเร็วสุดท้ายในการแยกของอนุภาค

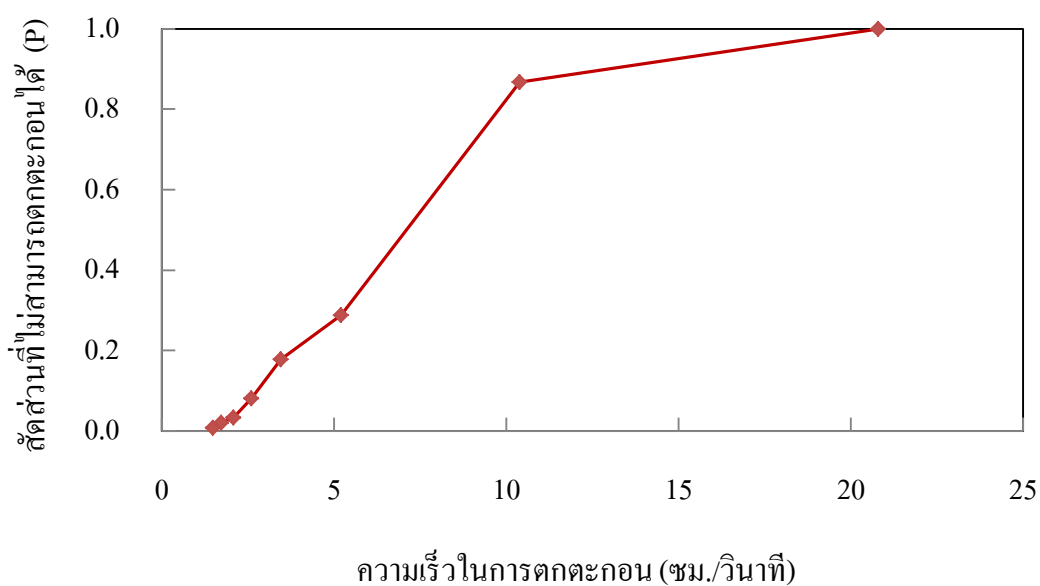
ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	อัตราไหลจ่ายเข้า (ลิตรต่อวินาที)	ความเร็วสุดท้ายในการแยก (ชม./วินาที)	ประสิทธิภาพในการแยก (ร้อยละ)
0.5	0.602	11.503	100
1	0.781	19.360	100
2	1.257	50.151	100

จากการคำนวณจะทำให้ทราบค่าความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคอันเนื่องมาจากความเร่งสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal settling velocity) ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5, 1 และ 2 เท่ากับ 11.503, 19.360, 50.151 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และประสิทธิภาพที่แยกได้ ณ ความดันจ่ายเข้าต่างๆ จะเท่ากับ ร้อยละ 100

การแยกโดยใช้ห้องตกตะกอน

ความเร็วในการตกตะกอนอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational settling velocity) สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling) โดยการนำถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช มาตกตะกอนในคอลัมน์ และเก็บตัวอย่างน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างบนคอลัมน์ทดสอบ จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ และนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้ (Penetration, P) กับความเร็วในการตกตะกอนของ

อนุภาค (Settling velocity, V) หรือค่าอัตราน้ำล้นผิว โดยค่าสัดส่วน P สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของตัวอย่างที่เวลาใดๆหารด้วยความเข้มข้นเริ่มต้น ส่วนความเร็วในการตกตะกอนคำนวณจากสัดส่วนระหว่างความลึกของจุดเก็บตัวอย่าง (Height of sampling point, h) หารด้วยเวลาที่เก็บตัวอย่าง (มันสิน ตัณฑุเวศน์, 2542) โดยผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.25 ซึ่งกราฟที่ได้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ



ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค

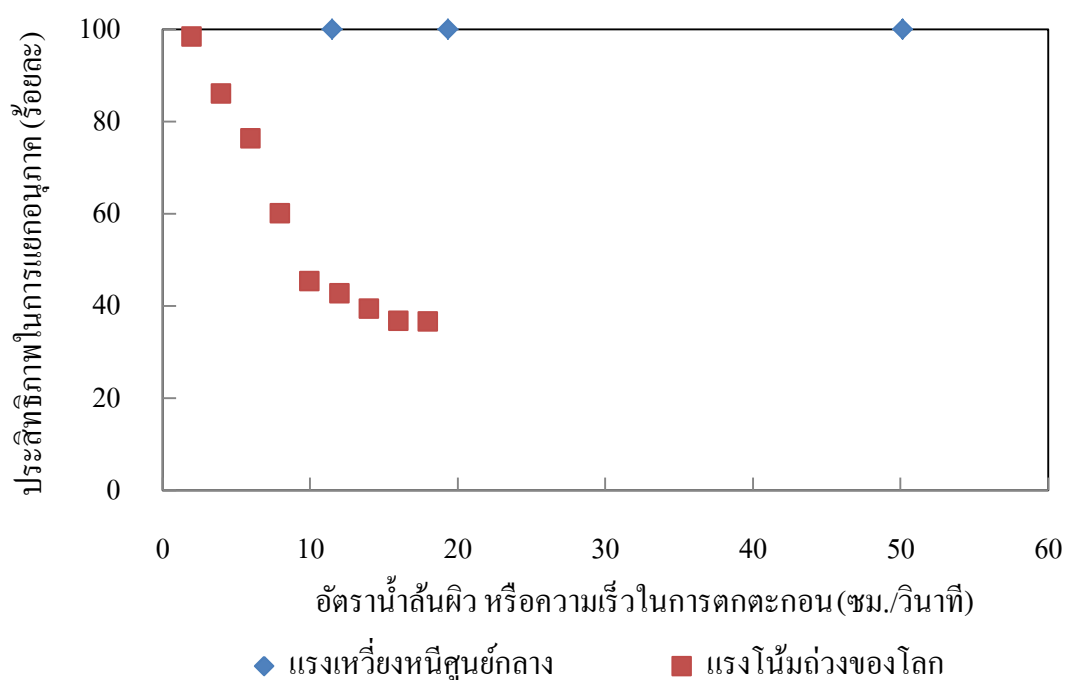
หลังจากนั้น ให้สมมติค่าอัตราน้ำล้นผิวใดๆ (V_0) และคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบโคตโดยอาศัยภาพที่ 4.25 และสมการที่ 4.16 โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.4 และผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.12

$$\eta_{\text{Sedimentation}} = (1 - P_0) + \int_0^{P_0} (V_i/V_0) dP_i \quad (4.16)$$

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ

U_0 (ชม./วินาที)	P_0	$\eta_{\text{Sedimentation}}$
2	0.025	98.33
4	0.21	86.00
6	0.355	76.33
8	0.6	60.00
10	0.82	45.33
12	0.859	42.73
14	0.91	39.33
16	0.949	36.73
18	0.951	36.60

หลังจากนั้นเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคและความเร็วในการตกตะกอนที่คำนวณได้จากอุปกรณ์ทั้งสองจึงถูกนำมารวมไว้ดังภาพที่ 4.26



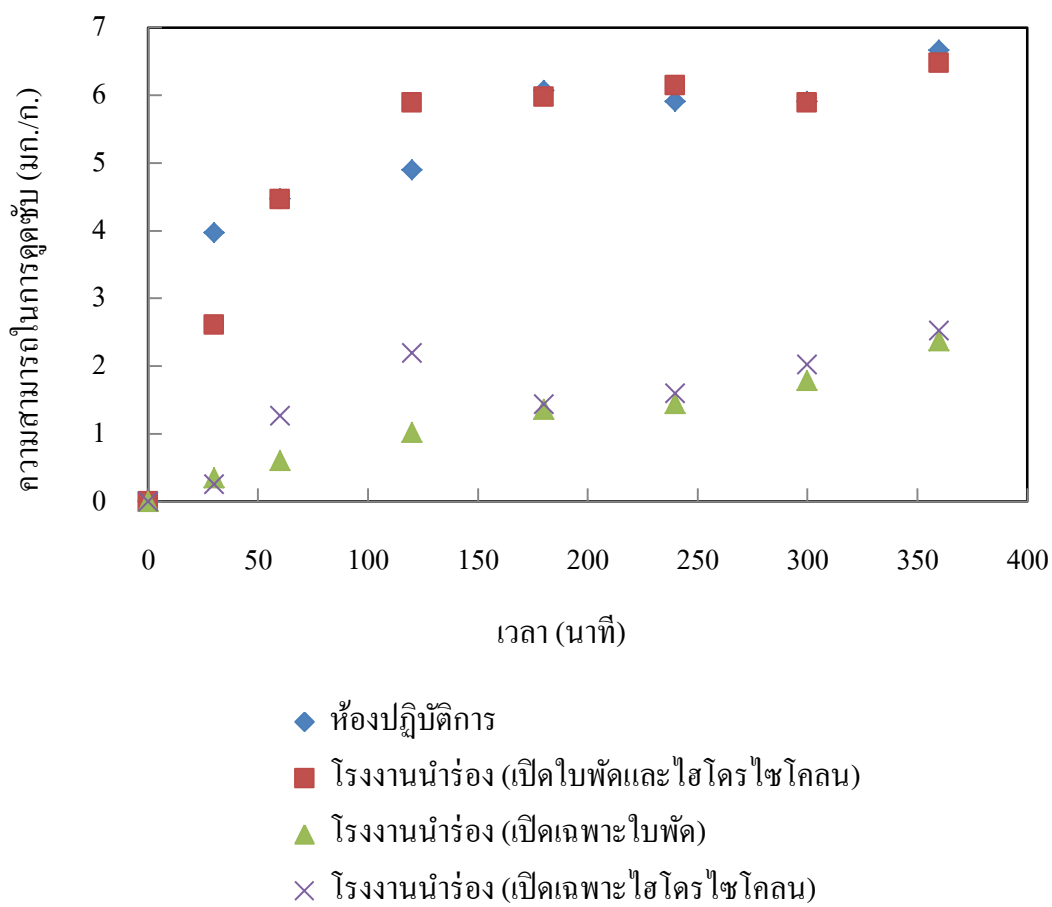
ภาพที่ 4.26 ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลน และการตกตะกอนแบบโคต

เนื่องจากที่ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเท่ากันอัตราน้ำล้นผิวของการใช้ไฮโดรไซโคลอนจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นพื้นที่และเวลาที่ใช้สำหรับการตกตะกอนจึงน้อยกว่าการใช้ถังตกตะกอน สมมติความต้องการใช้น้ำของพื้นที่แห่งหนึ่งเท่ากับ 250 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และต้องการกำจัดถ่านกัมมันต์ออกจากระบบด้วยประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 100 จากภาพที่ 4.26 จะทราบว่าอัตราน้ำล้นผิวสูงสุดที่แต่ละระบบต้องการ จะประมาณ 2 ซม./วินาที สำหรับการตกตะกอนแบบธรรมดา และ 11.50 ซม./วินาที สำหรับการตกตะกอนในไฮโดรไซโคลอน ดังนั้นพื้นที่ของระบบน้อยสุดที่ต้องการ คือ 3.47 ตารางเมตรสำหรับห้องตกตะกอนแบบธรรมดา และ 0.60 ตารางเมตรสำหรับไฮโดรไซโคลอน ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ต่างกันถึง 6 เท่า

4.7.3 เปรียบเทียบระหว่างการใช้ใบพัด การใช้ไฮโดรไซโคลอน และการใช้ใบพัดและไฮโดรไซโคลอนในการกวนผสม

ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch experiment) โดยใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่าง 9 มิลลิเมตร และเดินระบบที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เริ่มการทดลองโดยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นทำการเติมถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมช ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร ลงไปในถังที่ทำการเตรียมน้ำสังเคราะห์ไว้ แล้วทำการเดินระบบไฮโดรไซโคลอนและทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางออกด้านบน (Overflow) ที่เวลา 30, 60, 120, 180, 240, 300, และ 360 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (C) ที่เวลาต่างๆ โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เช่นเดียวกับการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำการทดลอง 3 สภาวะ คือ เปิดใช้ใบพัดและไฮโดรไซโคลอน เปิดใช้เฉพาะใบพัด และเปิดใช้เฉพาะไฮโดรไซโคลอน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.27 พบว่า การเปิดใช้ทั้งใบพัดและไฮโดรไซโคลอนจะทำให้ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ในโรงงานนำร่องมีค่าใกล้เคียงกับการดูดซับในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่การเปิดใช้ใบพัดหรือไฮโดรไซโคลอนเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่งจะทำให้ถ่านกัมมันต์บางส่วนจมอยู่ก้นถัง อีกทั้งส่งผลให้ระบบมีความปั่นป่วนไม่เพียงพอทำให้ฟิล์มน้ำ (ของไหล) ที่อยู่รอบตัวดูดซับหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลกรดฮิวมิกเข้าไปหาผิวของตัวดูดซับ จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงอย่างมาก



ภาพที่ 4.27 ความสามารถในการควบคุมกรดฮิวมิคของถ่านกัมมันต์ที่
สถานะในการเดินระบบแตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา รวมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ และการแยกของไฮโดรไซโคลน โดยการศึกษาประสิทธิภาพของระบบจะพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำดิบด้วยถ่านกัมมันต์ และส่วนของการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วด้วยไฮโดรไซโคลน

5.1.1 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

- ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า Hydrosorb bituminous coal base เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า และมีลักษณะของรูพรุนที่เหมาะสมกับการดูดซับกรดฮิวมิก คือ มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore)

- เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะสูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลายและความเข้มข้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงผลักดัน (Driving force) ที่มากขึ้น

- เมื่อปริมาณตัวกลางดูดซับสูงขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มตัวกลางดูดซับเปรียบได้กับการเพิ่มพื้นที่ผิวและบริเวณในการดูดซับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางดูดซับจนถึงค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการดูดซับจะคงที่ เนื่องจากความเข้มข้นของกรดฮิวมิกบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและในสารละลายมีความเข้มข้นอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งกันและกัน

- ไม่พบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการดูดซับที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5, 6, 7 และ 8 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพีเอชที่ใช้ในการทดลองมีความใกล้เคียงกัน

- เมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์เล็กลงความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เท่ากันขนาดของตัวดูดซับที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิว

มากกว่าส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ที่ให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดในงานวิจัยนี้ คือ 30x35 เมช

- จลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับของกรดอิวมิกและถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 คือ ปฏิกริยาอันดับสองเสมือน และฟรอนดลิกไอโซเทอม ตามลำดับ

5.1.2 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดของไฮโดรไซโคลอน

- เมื่อความดันจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลอนสูงขึ้น จะทำให้แรงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ภายในไฮโดรไซโคลอนเพิ่มมากขึ้น แต่ความดันจ่ายเข้าที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อการแยก เนื่องจากการเกิดแรงเฉือน และความปั่นป่วนที่มากเกินไปภายในไฮโดรไซโคลอน จะทำให้อนุภาคเกิดการแตกและเล็กลง ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไซโคลอนจึงลดน้อยลงด้วย โดยความดันจ่ายเข้าที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 1 บาร์

- เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเล็กลงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในการแยกอนุภาคก็จะลดลงด้วยเช่นกัน แต่ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้กลับตรงกันข้าม โดยพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดสามารถถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลอนได้ดีที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะชนกับใบพัดเครื่องสูบน้ำได้น้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อีกทั้งวัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ในการรับแรงกระทำมากกว่าวัตถุขนาดเล็ก ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จึงสามารถเกิดการแตกได้มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

- การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ออกทางทางออกด้านล่างมีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่า น้ำใสจะออกที่ทางออกด้านบนมากขึ้น แต่การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอนลดลงเล็กน้อย อีกทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างที่เล็กเกินไปจะก่อให้เกิดการอุดตันของถ่านกัมมันต์ในไฮโดรไซโคลอน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกด้านล่างที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ คือ 9 มิลลิเมตร

- เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอนเล็กลง ไฮโดรไซโคลอนจะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กได้ดีมากขึ้น ในขณะที่เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น ไฮโดรไซโคลอนก็จะสามารถรับโหลดได้สูงขึ้น จากการศึกษาภายในงานวิจัยนี้พบว่าไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ไม่สามารถแยกถ่านกัมมันต์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมช ได้ร้อยละ 100 ดังที่คาดหวังไว้ ดังนั้นไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เพราะจะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงมากขึ้นไปอีก

5.1.3 ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิก

- อัตราเร็วของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 ในการดูดซับกรดฮิวมิกภายในระบบไฮบริดจะเร็วกว่าภายในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิภายใน pilot plant สูงกว่าภายในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น

- ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ภายในระบบไฮบริด และในห้องปฏิบัติการไม่แตกต่างกันมากนัก โดยพบว่าบางครั้งความสามารถในการดูดซับของห้องปฏิบัติการสูงกว่าใน pilot plant แต่บางครั้งผลการทดลองก็ตรงกันข้าม ทั้งนี้เพราะมีทั้งปัจจัยด้านอุณหภูมิและการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับใน pilot plant

- ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous operating) มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้กำจัดกรดฮิวมิก โดยพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที จะต้องการอัตราการไหลตัวกลางดูดซับมากกว่า 1.5 กรัมต่อนาที ถึงจะบำบัดน้ำเสียให้ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเหลือน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มอัตราการไหลของตัวดูดซับ และ/หรือลดอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์

- เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่ของการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้ว พบว่าไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดต่ำกว่าค่า 100% ที่ได้คาดการณ์ไว้ โดยพบว่าประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมชของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ อยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 โดยประสิทธิภาพที่ลดลงสัมพันธ์กับการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ภายในไฮโดรไซโคลน

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

จากการศึกษาระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดพบว่าระบบไฮบริดสามารถนำไปใช้ในการกำจัดกรดฮิวมิกได้จริง แต่ระบบยังไม่สามารถแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วได้ร้อยละ 100 ดังที่คาดหวังไว้ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์สูงขึ้น โดย

- ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนให้เล็กลง เนื่องจากเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเล็กลงจะทำให้ความเร่งสู่ศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกเพิ่มขึ้น

- เลือกใช้ตัวกลางดูดซับที่มีความแข็งแรงขึ้น เนื่องจากการลดลงของประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนภายในงานวิจัยนี้เกิดจากการแตกของอนุภาคตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อตัวดูดซับมีความแข็งแรงขึ้นก็จะทนต่อแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนได้มากขึ้น ส่งผลให้ตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะแตกลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรรณิการ์ รักกิจ. 2547. การขจัดไอน้ำจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กฤษณ์ พลรัตน์. 2547. การขจัดกำมะถันจากกรดซัลฟูริกโดยการดูดซับบนโพแทสเซียมไอโอไดด์/ถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชุตินา กัลยาประสิทธิ์. 2551. ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมีโซพอร์สซึกลิตต่อการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เดชา นัทรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัญธรณ์ สวัสดิวงษ์. 2553. การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอดแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรภาภรณ์ ชาติสุนทร. 2546. ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรางศิริ ศรีสุภพัชร. 2551. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์และสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเต็ดสลักจ์ที่ย่อยสลายแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรศิริ เสียงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อิสริยาภรณ์ บุญยี่น. 2552. การดูดซับลิแกนด์และแทนนินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนจากกระบวนการเอเอสแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Bradley, D. 1965. The Hydrocyclone. New York: Pergamon Press Ltd. อ้างถึงใน วรศิริ เสี่ยงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Chen, J.P. and Wu, S.N. 2004. Simultaneous adsorption of copper ions and humic acid onto an activated carbon. Journal of Colloid and Interface Science. 280: 334–342.

City of Greeley Department Directors. Water Treatment Process [Online]. Available from: <http://greeleygov.com/Water/watertreatment.aspx> [2013, August 7].

Cooney, D.O. 1999. Adsorption design for wastewater treatment. 1st ed. United States of America: Lewis publishers.

Daifullah, A.A.M., Girgis, B.S. and Gad, H.M.H. 2004. A study of the factors affecting the removal of humic acid by activated carbon prepared from biomass material. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 235: 1-10.

Dwari, R.K., Biswas, M.N. and Meikap, B.C. 2004. Performance characteristics for particles of sand FCC and fly ash in a novel hydrocyclone. Chemical Engineering Science. 59: 671 – 684.

Heiskanen, K. 1993. Particle Classification. London: Chapman & Hall.

Huang, W. and Yeh, H. 1999. Reaction of chlorine with NOM adsorbed on powdered activated carbon. Water research. 33: 65-72.

Husveg, T., Rambeau, O., Drengstig, T. and Bilstad, T. 2007. Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates. Minerals Engineering. 20: 368–379.

Imyim, A. and Prapalimrungsi, E. 2010. Humic acids removal from water by aminopropyl functionalized rice husk ash. Journal of Hazardous Materials. 184: 775-781.

- Islam, M.A., Mozumder, M.S.I. and Khan, M.M.R. 2009. Design cum performance equation for a reactor type adsorption unit. Journal of scientific research. 1: 450-460.
- Lorenc-Grabowska, E. and Gryglewicz, G. 2005. Adsorption of lignite-derived humic acids on coal-based mesoporous activated carbons. Journal of Colloid and Interface Science. 284: 416–423.
- Maghsoodloo, Sh., Noroozi, B., Haghi, A.K. and Sorial, G.A. 2011. Consequence of chitosan treating on the adsorption of humic acid by granular activated carbon. Journal of Hazardous Materials. 191: 380-387.
- Muller, F.L.L. 1996. Measurement of electrokinetic and size characteristics of estuarine colloids by dynamic light scattering spectroscopy. AnalyticaChimicaActa. 331: 1-15.
- Nieuwenhuijzen, A.V. and Graaf, J.V.D. 2011. Handbook on particle separation processes. 1st ed. London: IWA Publishing.
- Piccin, J.S., Gomes, C.S., Feris, L.A. and Gutterres, M. 2012. Kinetics and isotherms of leather dye adsorption by tannery solid waste. Chemical Engineering Journal. 183: 30– 38.
- Pinheiroa, J.P., Mota, A.M., d'Oliveirab, J.M.R. and Martinhob, J.M.G. 1996. Dynamic properties of humic matter by dynamic light scattering and voltammetry. AnalyticaChimicaActa. 329: 15-24.
- Rastogi, K., Sahu, J.N., Meikap, B.C. and Biswas, M.N. 2008. Removal of methylene blue from wastewater using fly ash as an adsorbent by hydrocyclone. Journal of Hazardous Materials. 158: 531-540.
- Rauthula, M.S. and Srivastava, V.C. 2011. Studies on adsorption/desorption of nitrobenzene and humic acid onto/from activated carbon. Chemical Engineering Journal. 168: 35–43.
- Reynolds, T. D. and Richards, P.A. 1996. Unit Operations and Process in Environmental Engineering. 2nd ed. Boston: PWS Publishing.
- Rossman, B.J. 1997. Principles of Chemical Kinetics. USA: Wm.C. Brown Publishers, Inc.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. 1980. Water Chemistry. 1st ed. New York: John Wiley&Sons.
- Srivastava, V.C., Mall, I.D. and Mishra, I.M. 2006. Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption kinetics of metal ions from aqueous solution onto RHA. Journal of Hazardous Materials. B134: 257–267.

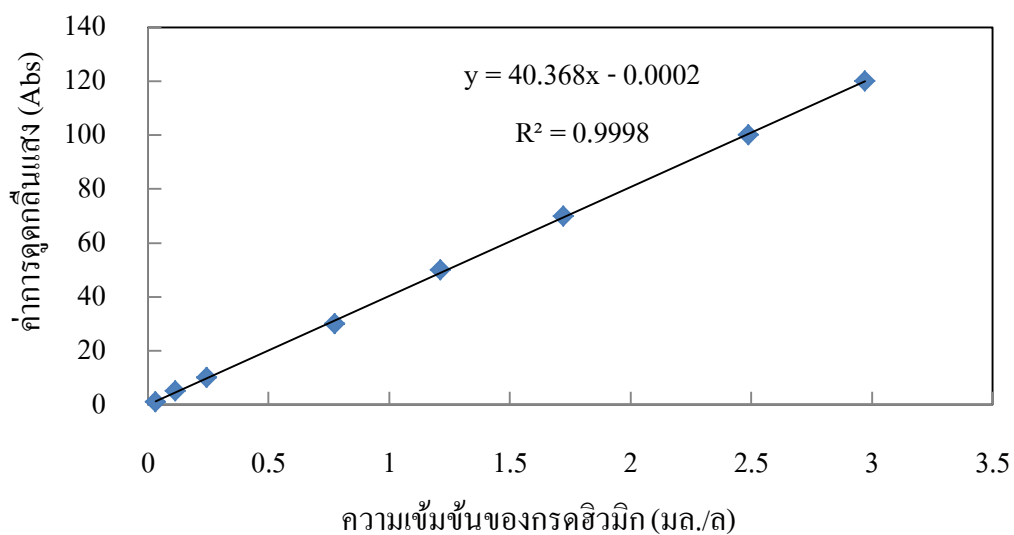
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายน้ำกลั่นผสมกรดฮิวมิก

ค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.033
5	0.114
10	0.244
30	0.774
50	1.213
70	1.723
100	2.488
120	2.973

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกและค่าการดูดกลืนแสง จะได้ผลแสดงดังภาพ ก.1

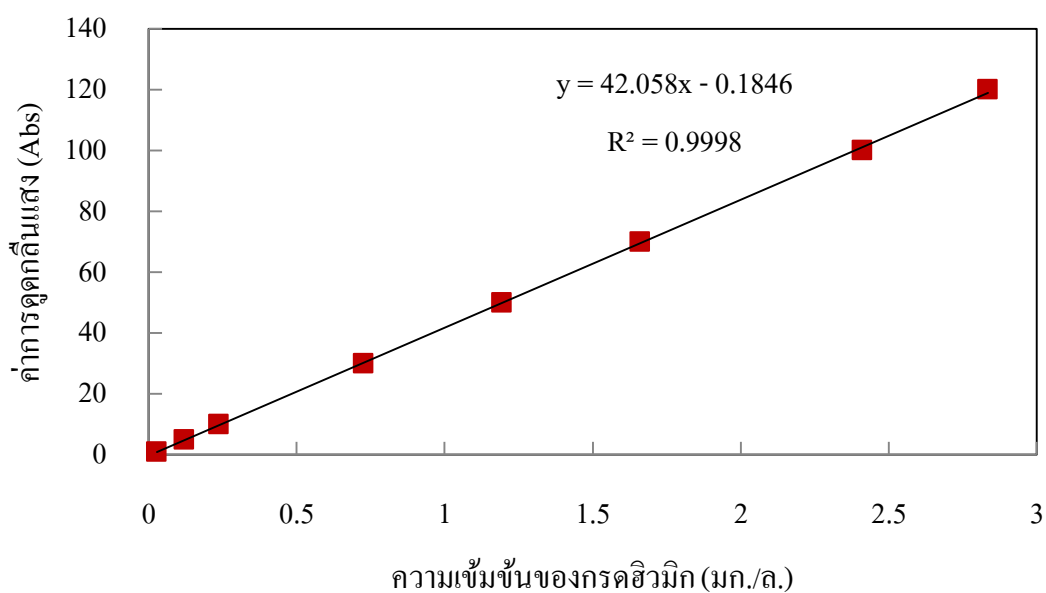


ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮิวมิก (น้ำกลั่น)

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายน้ำประปาผสมกรดฮิวมิก

ค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.028
5	0.12
10	0.237
30	0.727
50	1.193
70	1.661
100	2.412
120	2.835

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกและค่าการดูดกลืนแสง จะได้ผลแสดงดังภาพ ก.2



ตารางที่ ก.3 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 10 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช

ตารางที่ ก.3.1 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	29.47	2.05
120	25.79	2.42
180	24.26	2.57
300	20.59	2.94
600	16.39	3.36
900	15.10	3.49
1200	15.74	3.43
1500	14.29	3.57

ตารางที่ ก.3.2 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิด Hydrosorb bituminous coal base

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	42.02	0.80
120	41.38	0.86
180	41.09	0.89
300	39.40	1.06
600	39.04	1.10
900	41.50	0.85
1200	38.71	1.13
1500	37.99	1.20

ตารางที่ ก.4 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิคของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 20 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิคแตกต่างกัน

ตารางที่ ก.4.1 ความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิค 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	10	0
60	4.40	0.28
120	3.47	0.33
180	2.95	0.35
300	2.91	0.35
600	2.87	0.36
900	2.87	0.36
1200	2.66	0.37
1500	2.62	0.37

ตารางที่ ก.4.2 ความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิค 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	30	0
60	14.77	0.76
120	12.23	0.89
180	10.98	0.95
300	9.57	1.02
600	7.47	1.13
900	7.35	1.13
1200	6.94	1.15
1500	6.54	1.17

ตารางที่ ก.4.3 ความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50.00	0.00
60	24.75	1.26
120	22.20	1.39
180	20.14	1.49
300	17.16	1.64
600	13.08	1.85
900	13.08	1.85
1200	11.18	1.94
1500	10.78	1.96

ตารางที่ ก.4.4 ความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 70 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	70	0
60	41.63	1.42
120	34.60	1.77
180	30.69	1.97
300	25.80	2.21
600	22.60	2.37
900	18.65	2.57
1200	17.60	2.62
1500	16.92	2.65

ตารางที่ ก.4.5 ความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	100	0
60	55.34	2.23
120	52.24	2.39
180	47.39	2.63
300	42.02	2.90
600	34.03	3.30
900	28.98	3.55
1200	25.63	3.72
1500	24.99	3.75

ตารางที่ ก.5 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือแตกต่างกัน

ตารางที่ ก.5.1 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 0.02 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	45.90	8.20
120	45.90	8.20
180	45.78	8.45
300	43.80	12.40
600	44.12	11.76
900	43.68	12.64
1200	44.04	11.92
1500	44.69	10.63

ตารางที่ ก.5.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 0.1 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	43.72	12.56
120	43.56	12.89
180	42.47	15.07
300	42.83	14.34
600	42.39	15.23
900	40.77	18.46
1200	41.34	17.33
1500	41.09	17.81

ตารางที่ ก.5.3 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 0.5 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	43.03	13.94
120	41.90	16.20
180	42.02	15.95
300	40.41	19.18
600	40.89	18.21
900	38.75	22.49
1200	37.70	24.59
1500	37.99	24.03

ตารางที่ ก.5.4 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 2 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	39.96	20.07
120	38.19	23.62
180	37.42	25.16
300	33.95	32.10
600	32.50	35.01
900	28.62	42.76
1200	29.83	40.34
1500	29.35	41.31

ตารางที่ ก.5.5 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 6 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	33.55	32.91
120	31.12	37.75
180	28.78	42.44
300	26.56	46.88
600	23.25	53.50
900	20.95	58.10
1200	20.43	59.15
1500	19.42	61.17

ตารางที่ ก.5.6 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 10 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	29.47	41.06
120	25.79	48.41
180	24.26	51.48
300	20.59	58.83
600	16.39	67.22
900	15.10	69.81
1200	15.74	68.51
1500	14.29	71.42

ตารางที่ ก.5.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 20 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	24.75	50.51
120	22.20	55.60
180	20.14	59.71
300	17.16	65.69
600	13.08	73.84
900	13.08	73.84
1200	11.18	77.64
1500	10.78	78.44

ตารางที่ ก.5.8 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 30 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ)
0	50	0
60	21.56	56.89
120	17.24	65.53
180	14.94	70.13
300	12.88	74.25
600	11.67	76.67
900	10.41	79.17
1200	11.18	77.64
1500	11.30	77.39

ตารางที่ ก.6 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 10 กรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน

ตารางที่ ก.6.1 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่พีเอชเท่ากับ 5

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	31.29	37.43
120	27.21	45.58
180	24.14	51.72
300	23.17	53.66
600	20.75	58.50
900	18.45	63.10
1200	15.66	68.67
1500	15.95	68.11

ตารางที่ ก.6.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่พีเอชเท่ากับ 6

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	29.47	41.06
120	25.79	48.41
180	24.26	51.48
300	20.59	58.83
600	16.39	67.22
900	15.10	69.81
1200	15.74	68.51
1500	14.29	71.42

ตารางที่ ก.6.3 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่พีเอชเท่ากับ 7

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	32.54	34.93
120	28.50	43.00
180	25.71	48.57
300	22.89	54.22
600	17.96	64.07
900	16.63	66.74
1200	14.69	70.61
1500	13.93	72.15

ตารางที่ ก.6.4 ประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่พีเอชเท่ากับ 8

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	32.01	35.98
120	28.90	42.19
180	25.75	48.49
300	23.13	53.74
600	18.97	62.05
900	16.51	66.98
1200	15.26	69.48
1500	14.17	71.66

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกลือ 10 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน

ตารางที่ ก.7.1 ความสามารถในการดูดซับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0
60	30.32	1.96
120	27.81	2.22
180	25.15	2.47
300	22.77	2.72
600	18.89	3.10
900	18.00	3.20
1200	15.90	3.41
1500	14.90	3.51

ตารางที่ ก.7.2 ความสามารถในการดูดซับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 16x18 เมช

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0.00
60	29.51	2.05
120	26.00	2.40
180	23.98	2.60
300	21.03	2.90
600	17.64	3.24
900	15.42	3.46
1200	14.65	3.53
1500	12.88	3.71

ตารางที่ ก.7.3 ความสามารถในการดูดซับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 20x24 เมช

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0.00
60	25.79	2.42
120	23.01	2.70
180	20.51	2.95
300	17.80	3.22
600	14.53	3.55
900	12.27	3.77
1200	13.24	3.68
1500	11.55	3.85

ตารางที่ ก.7.4 ความสามารถในการดูดซับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	50	0.00
60	21.76	2.82
120	18.13	3.19
180	16.11	3.39
300	13.77	3.62
600	11.55	3.85
900	10.78	3.92
1200	10.09	3.99
1500	8.48	4.15

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ ก.8.1 ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_0 (มก./ล.)	t นาที	$t^{1/2}$ (นาที) ^{1/2}	C_t (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)	q_t (มก./ก.)	t/ q_t	$\log(q_e - q_t)$
10	0.00	0.00	10.00	0.37	0.00	0.00	-0.43
	60	7.75	4.40	0.37	0.28	214.28	-1.05
	120	10.95	3.47	0.37	0.33	367.62	-1.37
	180	13.42	2.95	0.37	0.35	510.43	-1.78
	300	17.32	2.91	0.37	0.35	845.90	-1.84
	600	24.49	2.87	0.37	0.36	1682.25	-1.90
	900	30.00	2.87	0.37	0.36	2523.38	-1.90
	1500	38.73	2.66	0.37	0.37	4089.47	-2.61
	1800	42.43	2.62	0.37	0.37	4874.89	-

ตารางที่ ก.8.3 ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_0 (มก./ล.)	t นาที	$t^{1/2}$ (นาที) ^{1/2}	C_t (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)	q_t (มก./ก.)	t/ q_t	log ($q_e - q_t$)
30	0.00	0.00	30.00	1.17	0.00	0.00	0.07
	60	7.75	14.77	1.17	0.76	78.82	-0.39
	120	10.95	12.23	1.17	0.89	135.07	-0.55
	180	13.42	10.98	1.17	0.95	189.27	-0.65
	300	17.32	9.57	1.17	1.02	293.64	-0.82
	600	24.49	7.47	1.17	1.13	532.57	-1.33
	900	30.00	7.35	1.17	1.13	794.59	-1.39
	1500	38.73	6.94	1.17	1.15	1301.13	-1.69
	1800	42.43	6.54	1.17	1.17	1534.42	-

ตารางที่ ก.8.4 ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_0 (มก./ล.)	t นาที	$t^{1/2}$ (นาที) ^{1/2}	C_t (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)	q_t (มก./ก.)	t/ q_t	log ($q_e - q_t$)
50	0.00	0.00	50.00	1.96	0.00	0.00	0.29
	60	7.75	24.75	1.96	1.26	47.52	-0.16
	120	10.95	22.20	1.96	1.39	86.34	-0.24
	180	13.42	20.14	1.96	1.49	120.58	-0.33
	300	17.32	17.16	1.96	1.64	182.68	-0.50
	600	24.49	13.08	1.96	1.85	325.02	-0.94
	900	30.00	13.08	1.96	1.85	487.53	-0.94
	1500	38.73	11.18	1.96	1.94	772.83	-1.69
	1800	42.43	10.78	1.96	1.96	917.85	-

ตารางที่ ก.8.5 ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 70 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_0 (มก./ล.)	t นาที	$t^{1/2}$ (นาที) ^{1/2}	C_t (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)	q_t (มก./ก.)	t/ q_t	log ($q_e - q_t$)
70	0.00	0.00	70.00	2.65	0.00	0.00	0.42
	60	7.75	41.63	2.65	1.42	42.30	0.09
	120	10.95	34.60	2.65	1.77	67.80	-0.05
	180	13.42	30.69	2.65	1.97	91.57	-0.16
	300	17.32	25.80	2.65	2.21	135.75	-0.35
	600	24.49	22.60	2.65	2.37	253.16	-0.55
	900	30.00	18.65	2.65	2.57	350.57	-1.06
	1500	38.73	17.60	2.65	2.62	572.57	-1.46
	1800	42.43	16.92	2.65	2.65	678.20	-

ตารางที่ ก.8.6 ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_0 (มก./ล.)	t นาที	$t^{1/2}$ (นาที) ^{1/2}	C_t (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)	q_t (มก./ก.)	t/ q_t	log ($q_e - q_t$)
100	0.00	0.00	100.00	3.75	0.00	0.00	0.57
	60	7.75	55.34	3.75	2.23	26.87	0.18
	120	10.95	52.24	3.75	2.39	50.25	0.13
	180	13.42	47.39	3.75	2.63	68.43	0.05
	300	17.32	42.02	3.75	2.90	103.49	-0.07
	600	24.49	34.03	3.75	3.30	181.90	-0.34
	900	30.00	28.98	3.75	3.55	253.46	-0.70
	1500	38.73	25.63	3.75	3.72	403.39	-1.49
	1800	42.43	24.99	3.75	3.75	479.92	-

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับ

ตารางที่ ก.9.1 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสารละลายกรดฮิวมิก (น้ำกลั่นผสมกรดฮิวมิก) ของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช

C_0 (มก./ล.)	m (ก./ล.)	C_e (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)
50	0.002	44.69	265.64
	0.01	41.09	89.06
	0.5	37.99	24.03
	2	29.35	10.33
	6	19.42	5.10
	10	14.29	3.57
	20	10.78	1.96
	30	11.30	1.29

ตารางที่ ก.9.2 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสารละลายกรดฮิวมิก (น้ำกลั่นผสมกรดฮิวมิก) ของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x40 เมช

C_0 (มก./ล.)	m (ก./ล.)	C_e (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)
50	0.002	44.77	243.74
	0.01	41.70	76.61
	0.5	36.29	26.11
	2	25.96	11.88
	6	16.83	5.49
	10	13.28	3.65
	20	10.01	1.99
	30	9.57	1.34

ตารางที่ ก.9.3 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสารละลายกรดฮิวมิก (น้ำประปาผสมกรดฮิวมิก) ของถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x40 เมช

C_0 (มก./ล.)	m (ก./ล.)	C_e (มก./ล.)	q_e (มก./ก.)
50	0.002	43.43	273.77
	0.01	39.27	95.84
	0.5	34.26	30.98
	2	27.36	11.26
	6	19.20	5.12
	10	13.48	3.65
	20	8.06	2.10
	30	7.22	1.43

ตารางที่ ก.10 ผลของความดันจ่ายเข้าต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ ก.10.1 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์

เวลา (นาที)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	0.595	0.540	0.055	1.220	0.026	6.936	47.44
30	0.613	0.560	0.053	0.554	0.034	3.308	47.16
60	0.598	0.545	0.054	0.302	0.037	1.713	46.16
120	0.591	0.548	0.043	0.174	0.038	1.077	40.76
180	0.597	0.546	0.052	0.106	0.068	0.632	46.96
240	0.622	0.572	0.050	0.068	0.040	0.359	37.38
300	0.613	0.561	0.052	0.042	0.045	0.188	32.22
360	0.587	0.536	0.051	0.031	0.048	0.130	30.39

ตารางที่ ก.10.2 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของ ถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์

เวลา (นาทีก)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	0.788	0.716	0.072	1.328	0.014	7.205	44.68
30	0.812	0.746	0.066	0.865	0.018	5.114	43.72
60	0.745	0.681	0.064	0.554	0.020	2.614	46.82
120	0.753	0.685	0.068	0.415	0.026	2.731	55.53
180	0.753	0.689	0.064	0.245	0.028	1.874	61.74
240	0.743	0.683	0.060	0.157	0.024	0.901	41.48
300	0.784	0.724	0.060	0.122	0.031	0.821	47.73
360	0.808	0.748	0.060	0.127	0.031	0.783	41.19

ตารางที่ ก.10.3 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของ ถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ที่ความดันจ่ายเข้า 2 บาร์

เวลา (นาทีก)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	1.348	1.263	0.085	0.998	0.014	4.665	24.69
30	1.223	1.139	0.084	0.590	0.014	3.666	38.27
60	1.222	1.139	0.082	0.517	0.024	2.935	33.79
120	1.299	1.223	0.076	0.255	0.022	1.668	34.15
180	1.249	1.223	0.076	0.170	0.026	1.108	36.37
240	1.247	1.172	0.077	0.125	0.026	0.909	40.14
300	1.207	1.172	0.075	0.100	0.028	0.707	38.82
360	1.261	1.206	0.055	0.081	0.028	0.658	26.28

ตารางที่ ก.11 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ ก.11.1 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช

เวลา (นาที)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	0.788	0.716	0.072	1.328	0.014	7.205	44.68
30	0.812	0.746	0.066	0.865	0.018	5.114	43.72
60	0.745	0.681	0.064	0.554	0.020	2.614	46.82
120	0.753	0.685	0.068	0.410	0.026	2.731	55.53
180	0.753	0.689	0.064	0.245	0.028	1.874	61.74
240	0.743	0.683	0.060	0.157	0.024	0.901	41.48
300	0.784	0.724	0.060	0.122	0.031	0.821	47.73
360	0.808	0.748	0.060	0.127	0.031	0.783	41.19

ตารางที่ ก.11.2 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลน
เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 16x18 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	0.772	0.705	0.068	1.397	0.013	6.697	36.56
30	0.777	0.711	0.065	0.902	0.017	5.306	44.96
60	0.757	0.694	0.063	0.501	0.024	3.807	59.66
120	0.746	0.684	0.064	0.221	0.027	1.811	64.87
180	0.703	0.641	0.062	0.136	0.029	1.213	76.71
240	0.744	0.684	0.060	0.155	0.032	0.899	42.29
300	0.821	0.761	0.060	0.090	0.032	0.687	52.1
360	0.806	0.744	0.062	0.079	0.029	0.531	47.89

ตารางที่ ก.11.3 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลน
เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 20x24 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	0.688	0.629	0.060	1.161	0.014	6.997	47.82
30	0.765	0.700	0.065	0.732	0.019	5.048	55.18
60	0.767	0.705	0.063	0.352	0.029	2.304	49.28
120	0.690	0.630	0.061	0.219	0.030	1.788	68.97
180	0.748	0.689	0.059	0.136	0.031	1.056	57.83
240	0.704	0.645	0.059	0.104	0.033	0.795	60.53
300	0.698	0.639	0.059	0.087	0.031	0.615	55.83
360	0.707	0.650	0.057	0.079	0.032	0.549	51.87

ตารางที่ ก.11.3 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลน
เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
15	0.729	0.664	0.066	1.116	0.014	8.927	69.29
30	0.668	0.604	0.064	0.702	0.021	6.381	85.32
60	0.728	0.666	0.062	0.514	0.025	3.440	53.01
120	0.711	0.650	0.061	0.309	0.031	2.341	61.62
180	0.717	0.657	0.060	0.206	0.039	1.769	69.04
240	0.694	0.634	0.060	0.186	0.034	1.487	65.94
300	0.696	0.636	0.060	0.150	0.042	1.134	61.59
360	0.729	0.670	0.059	0.134	0.040	1.059	60.89

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองระบบทีละเท (Batch experiment) ของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.12.1 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 ในโรงงานนำร่อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	7.51	0.00
30	6.21	2.61
60	5.28	4.46
120	4.57	5.89
180	4.53	5.97
240	4.44	6.14
300	4.57	5.89
360	4.27	6.48

ตารางที่ ก.12.2 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb200 ในโรงงานนำร่อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	46.46	0.00
30	41.62	48.37
60	41.20	52.57
120	41.07	53.83
180	40.99	54.68
240	40.06	63.93
300	39.18	72.76
360	38.00	84.54

ตารางที่ ก.12.3 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 ใน pilot plant ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัมต่อ

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	44.82	0.00
30	40.36	8.92
60	40.15	9.34
120	38.51	12.62
180	36.87	15.90
240	36.83	15.98
300	35.69	18.25
360	35.44	18.76

ตารางที่ ก.12.4 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 ใน pilot plant ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
0	47.55	0.00
30	38.21	4.67
60	34.72	6.41
120	29.47	9.04
180	23.58	11.99
240	18.99	14.28
300	10.29	18.63
360	8.82	19.37

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) ของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.13.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียตั้งคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (มก./ล.)			
		0.5	1	2.5	5
0		10.00	10.00	10.00	10.00
10		7.17	6.75	4.68	4.22
30		6.28	6.54	4.73	3.76
60		6.45	6.45	3.76	3.55
120		6.62	6.37	3.42	1.95
180		7.17	5.82	3.13	1.78
240		7.17	6.32	2.79	1.57
300		6.87	5.90	1.82	1.45
360		6.83	5.15	2.67	1.28

ตารางที่ ก.13.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดซิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นของกรดซิวมิกที่เหลืออยู่ (มก./ล.)		
	0.5	2	4
เวลา (นาที)			
0	10.00	10.00	10.00
10	7.17	7.68	9.45
30	6.28	6.59	9.03
60	6.45	6.29	9.03
120	6.62	5.96	9.53
180	7.17	6.54	10.00
240	7.17	6.97	10.00
300	6.87	7.93	10.00
360	6.83	7.97	10.00

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.14.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของตัวดูดซับ (กรัมต่อนาที)	ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (มก./ล.)		
		0.5	1.5	5
0		10.00	10.00	10.00
10		7.13	7.26	7.01
20		6.80	6.92	6.75
30		6.63	6.50	6.59
60		6.29	4.44	2.84
90		6.21	4.23	3.31
120		6.50	3.94	2.89
150		6.21	3.94	3.35
180		6.33	3.64	2.21
210		6.25	3.90	2.17

ตารางที่ ก.14.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสีย
สังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที

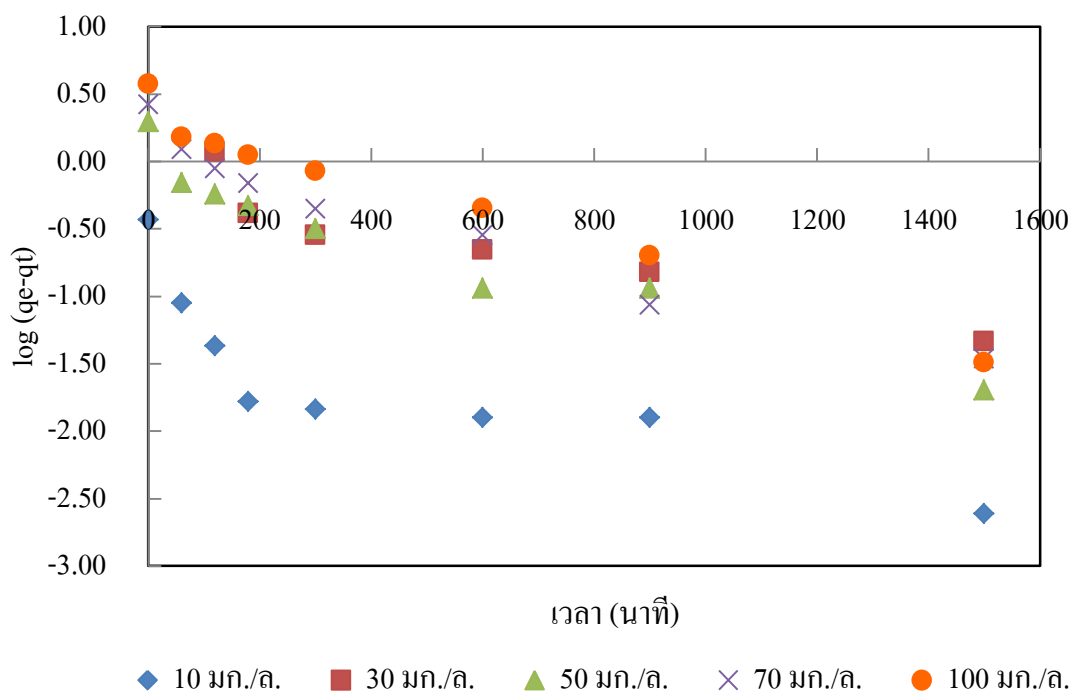
เวลา (นาที)	อัตราการไหลของตัวดูดซับ (กรัมต่อนาที)	ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลืออยู่ (มก./ล.)		
		0.2	0.5	1.5
0		50.00	50.00	50.00
10		39.77	41.37	40.11
20		37.84	38.26	38.21
30		35.23	35.82	36.62
60		32.92	31.99	33.97
90		32.45	30.27	32.92
120		30.90	29.89	32.07
150		30.69	28.96	30.90
180		31.06	28.12	31.19
210		30.81	29.17	28.67

ตารางที่ ก.15 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะในการเดินระบบแตกต่างกัน

เวลา (นาท)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)			
	ห้องปฏิบัติการ	โรงงานนำร่อง		
		(ไบพัตและไฮโดรไซโคลน)	(ไบพัต)	(ไฮโดรไซโคลน)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
30	3.97	2.61	0.35	0.25
60	4.47	4.46	0.60	1.26
120	4.89	5.89	1.02	2.19
180	6.07	5.97	1.36	1.43
240	5.90	6.14	1.44	1.60
300	5.90	5.89	1.78	2.02
360	6.66	6.48	2.37	2.52

ภาคผนวก ข.
รายการตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ข.1 ตัวอย่างการคำนวณจลนศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

กราฟที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับเวลา

ตารางที่ ข.1 สมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น	สมการเส้นตรง	R^2
10	$y = -0.001x - 1.1309$	0.6866
30	$y = -0.0008x - 0.1159$	0.8779
50	$y = -0.0011x - 0.0449$	0.9227
70	$y = -0.0012x - 0.1397$	0.9417
100	$y = -0.0012x + 0.3489$	0.9730

สมมติพิจารณา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล.

$$\text{จาก} \quad \log(q_e - q_t) = \log q_e + \frac{k_1 t}{2.303}$$

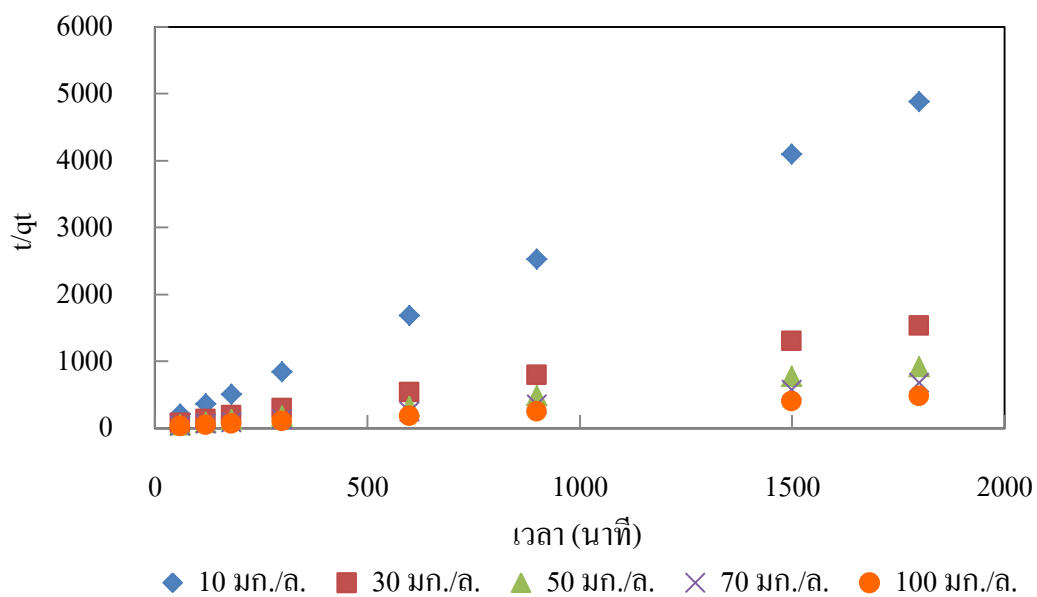
$$\text{จะได้ว่า} \quad \text{Slope} = \frac{k_1}{2.303} = -0.001$$

$$\text{ดังนั้น} \quad k_1 = -0.0023 \text{ นาที}^{-1}$$

$$\text{และ} \quad \log q_e = -1.1309$$

$$q_e = 0.0740 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ภาคผนวก ข.2 ตัวอย่างการคำนวณจลน์ศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน



กราฟที่ ข.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t และเวลา

ตารางที่ ข.2 สมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น	สมการเส้นตรง	R^2
10	$y = 2.6938x + 49.997$	0.9998
30	$y = 0.8376x + 35.762$	0.9998
50	$y = 0.4971x + 28.262$	0.9996
70	$y = 0.3640x + 25.560$	0.9997
100	$y = 0.2561x + 21.175$	0.9991

สมมติพิจารณา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล.

จากปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$

จะได้ว่า Slope = $\frac{1}{q_e} = 2.6938$

ดังนั้น $q_e = 0.37$ มิลลิกรัมต่อกรัม

และ $\frac{1}{k_2 q_e^2} = 49.997$

$$\frac{1}{k_2 (0.37)} = 49.997$$

$$k_2 = 0.145 \text{ กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที}$$

ภาคผนวก ข.3 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 9 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ก.10.1)

สมมติพิจารณา ที่เวลา 15 นาที จะได้ว่าประสิทธิภาพในการแยกสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100$$

$$\text{โดย } R_f = \frac{Q_u}{Q_f} = \frac{0.055}{0.595}$$

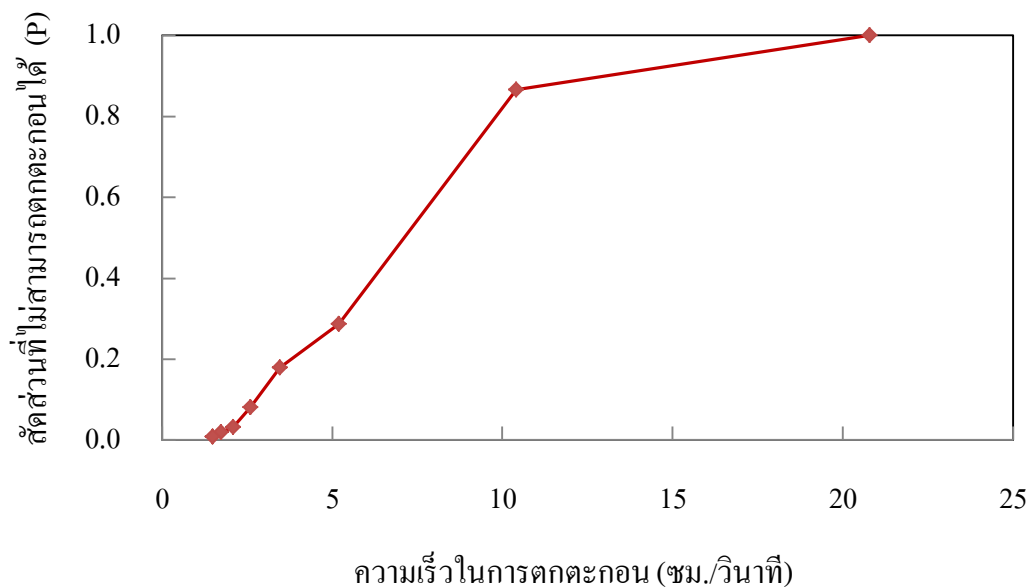
$$= 0.092$$

$$\text{และ } E_T = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} = \frac{0.055 \times 6.936}{0.595 \times 1.220}$$

$$= 0.5255$$

$$\text{ดังนั้น } E'_T = \left(\frac{0.5255 - 0.092}{1 - 0.092} \right) \times 100 = 47.44 \%$$

ภาคผนวก ข.4 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบโคคของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค

สูตร ในการหาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบโคค คือ

$$\eta_{\text{Sedimentation}} = (1 - P_0) + \int_0^{P_0} (V_i/V_0) dP_i$$

เมื่อสมมติให้อัตราน้ำล้นผิว คือ 2 ชม./วินาที สามารถหาค่า P_0 ได้จากกราฟ ข.3 เท่ากับ 0.025

$$\text{ดังนั้น} \quad 1 - P_0 = 1 - 0.025 = 0.975$$

เนื่องจากกราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลา ซึ่งมีสมการเป็น

$$P^2 = 4CV$$

ทำการหาค่าคงที่ C โดยแทนค่า $V = 2$ และ $P = 0.0025$ ซึ่งจะได้ค่า C เท่ากับ 0.000078 และเมื่อเขียนสมการใหม่ ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ P จะได้

$$V_i = \frac{P_i^2}{4 \times 0.000078} = 3200P_i^2$$

จะได้

$$\int_0^{P_0} \left(\frac{V_i}{V_0} \right) dP_i = \frac{1}{2} \int_0^{P_0} 3200P_i^2 dP_i = \frac{1600}{3} P^3|_0^{0.025} = 0.0083$$

ดังนั้น

$$\eta_{\text{Sedimentation}} = 0.975 + 0.0083 = 0.983$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ลักขิกา กองวิเชียร เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม International conference “ Environmental and Hazardous Substance Management towards a Green Economy (EHSM 2013) จัดขึ้นที่ โรงแรม Imperial Queen Park จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในชื่อหัวข้อ Development of a Hybrid Process (Adsorption and Hydrocyclone) for the Treatment of Humic Acid Presence in Liquid Phase เมื่อวันที่ 21-23 พฤษภาคม 2556

งานประชุม International Conference on Water and Environment Technology Conference 2013 (WET2013) จัดที่มหาวิทยาลัย Tokyo University of Agriculture & Technology. ในชื่อหัวข้อ Hybrid Process (Adsorption and Hydrocyclone) for the Treatment of Humic Acid Presence in Liquid Phase วันที่ 15-16 มิถุนายน 2556 และได้รับรางวัล WET Excellent Research Award จากงานประชุมนี้