

การประยุกต์ใช้ระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด  
ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม



นายศุภุศย์ ดำรงค์กิจการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

APPLICATION OF HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE AND GAC ADSORPTION, FOR  
DECOLORIZATION OF DYE WASTEWATER

Mr. Supabut Damrongkijkarn



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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	การประยุกต์ใช้ระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม
โดย	นายศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

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

ศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ : การประยุกต์ใช้ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม. (APPLICATION OF HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE AND GAC ADSORPTION, FOR DECOLORIZATION OF DYE WASTEWATER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ชัยพร ภู่งประเสริฐ, 131 หน้า.

จุดประสงค์ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาประยุกต์ใช้เพื่อการกำจัดสีในน้ำเสียสีย้อมโดยใช้สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ ทำการเปรียบเทียบความสามารถของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผงในการดูดซับสีย้อม รวมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเดินระบบไฮบริดในงานวิจัยนี้ คือ ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30x35 เมช และใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 9 มิลลิเมตร ในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากเฟสน้ำ ที่ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน 1 บาร์ อย่างไรก็ตามจากการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ในระบบไฮโดรไซโคลนจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดของไฮโดรไซโคลนมีค่าประมาณร้อยละ 40-70 จากการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถคำนวณปริมาณตัวกลางดูดซับในระบบที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียได้ จากนั้น เมื่อพิจารณาในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบต่อเนื่อง พบว่า การกำจัดสีย้อมที่อัตราการไหลของน้ำเสียสีย้อม 0.5 ลิตรต่อนาที ระบบไฮบริดสามารถลดความเข้มข้นสีย้อมจาก 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ด้วยอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับมากกว่า 2.0 กรัมต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5470399721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ADSORPTION / GRANULAR ACTIVATED CARBON / HYBRID PROCESS / HYDROCYCLONE / REACTIVE DYE

SUPABUT DAMRONGKIJKARN: APPLICATION OF HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE AND GAC ADSORPTION, FOR DECOLORIZATION OF DYE WASTEWATER. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 131 pp.

The purpose of this research was to study the application of the hybrid process (adsorption with hydrocyclone) to decolorize dye wastewater of black reactive dye. Moreover, the adsorption capacity of Granular activated carbon (GAC) and Powder activated carbon (PAC) was analyzed. The various parameters affecting on the adsorption capacity and the separation efficiency of hydrocyclone were also studied in this work.

The result has been shown that the optimum conditions were using Granular activated carbon (Filtrisorb 200) with the diameter of 30x35 mesh, and the 50 mm hydrocyclone with a 9 mm diameter apex was required at inlet pressure of 1 bar. However, due to the breaking of particles of adsorbent in hydrocyclone system, the efficiency of separation was approximately 40 to 70 percent. The adsorption in semi-continuous hybrid process can be used to calculate amount of adsorbent in the system: this relates with the wastewater flow rate. Furthermore, concerning to the continuous operation of hybrid process, it can be noted that the flow rate of adsorbent of more than 2 g/min should be applied in order to reduce the concentration of dye wastewater from 150 mg/L to below 2 mg/L.

Department: Environmental  
Engineering

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2013

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการปฏิบัติ หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาของการวิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว และดร. ศรายุทธ ราชู ที่ได้ให้คำชี้แนะ และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการน้ำดี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณ น.ส. ลักษิกา กองวิเชียร น.ส. ณัฐริยา สุวรรณสินธุ์ น.ส. สุกนิช เลิศลาภสิน น.ส. นัทธมน สุวรรณหาญ และนายธนากร อ้อมมุกดากุล ที่เป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัย คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในระหว่างทำงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณมารดา ลุง ยาย และน้องชาย ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ตัวถูกดูดซับ (สีย้อม) .....	5
2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม .....	5
2.1.2 เคมีของสีย้อม.....	6
2.1.3 สีย้อมที่เลือกสำหรับงานวิจัย .....	6
2.2 สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) .....	6
2.2.1 สมบัติของสีรีแอกทีฟ .....	6
2.2.2 โครงสร้างทางเคมี.....	7
2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม .....	7
2.2.4 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม .....	8
2.2.5 สีของน้ำเสีย.....	8
2.2.6 การวัดสี.....	9
2.2.6.1 วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum Cobalt Standard).....	9
2.2.6.2 วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) .....	9
2.3 กระบวนการกำจัดสีย้อม.....	9

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	10
2.4.1 ประเภทของการดูดซับ .....	10
2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	10
2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี .....	11
2.4.2 กลไกการดูดซับ .....	11
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ .....	11
2.4.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ .....	11
2.4.3.2 ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดซับ.....	11
2.4.3.3 อุณหภูมิ .....	12
2.4.3.4 ความปั่นป่วน.....	12
2.4.3.5 พีเอช .....	12
2.4.4 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ .....	12
2.4.5 ไอโซเทอมการดูดซับ (Valencia และ Gloyna, 1972).....	14
2.4.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ...	14
2.4.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm).	14
2.4.5.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเรดลิช-เพทเทอร์สัน (Redlich-Peterson adsorption isotherm) (Redlich และ Peterson, 1959).....	15
2.4.6 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Gulnaz และคณะ, 2006) .....	16
2.4.6.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction).....	16
2.4.6.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction).....	16
2.4.6.3 ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion) .....	17
2.5 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) .....	17
2.5.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	17
2.5.1.1 รูพรุน (Pores).....	17
2.5.1.2 พื้นที่ผิว (Surface area) .....	17
2.5.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์แบ่งตามขนาด.....	18
2.5.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ .....	18
2.5.4 การประเมินและการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ (รัชชัย สิงหศิริ ,2548).....	19



2.6 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone).....	19
2.6.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน.....	19
2.6.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน (Fluid Flow and Particle Motion in Hydrocyclone).....	23
2.6.3 ความเร็วของการไหลในไฮโดรไซโคลน (Velocity in hydrocyclone).....	24
2.6.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity, $V_y$ ).....	25
2.6.3.2 ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, $V_z$ ).....	27
2.6.3.3 ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, $V_x$ ).....	27
2.6.4 กฎของสโตค (Stoke's law).....	28
2.6.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984).....	30
2.6.5.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน.....	30
2.6.5.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล (Aperture diameters).....	30
2.6.5.3 ความยาว ขนาดและรูปร่างของช่องน้ำออกส่วนบน (Vortex finder dimensions).....	32
2.6.5.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน (Body dimension).....	33
2.6.5.5 ขนาดและลักษณะของช่องท่อจ่ายของผสมเข้าไฮโดรไซโคลน.....	34
2.6.5.6 สรุปลักษณ์ของตัวแปรต่างๆที่มีต่อไฮโดรไซโคลน.....	35
2.6.6 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน (Separation efficiency).....	36
2.6.6.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency, Mass recovery, Retention).....	36
2.6.6.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency).....	37
2.6.6.3 ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency).....	38
2.6.7 ขนาดตัด (Cut size).....	39
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.7.1 การออกแบบกระบวนการดูดซับ.....	39
2.7.2 การออกแบบกระบวนการต่อเนื่องแบบตัวกลางเคลื่อนที่.....	42
2.7.3 การออกแบบไฮโดรไซโคลน.....	42
2.7.4 การออกแบบกระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	43
2.7.5 สรุปข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	46
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี .....	46
3.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	46
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ .....	47
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	47
3.1.4 สารเคมี.....	47
3.2 ภาพรวมของการวิจัย .....	48
3.3 แผนการทดลอง.....	49
3.4 ตัวถูกดูดซับ (สีย้อม) .....	52
3.5 ตัวดูดซับ (ถ่านกัมมันต์) .....	53
3.6 ไฮโดรไซโคลน .....	54
3.7 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	55
3.7.1 น้ำเสียดีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ.....	55
3.7.2 การทดลองที่ 1 การทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (ชนิดและปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ รวมถึงจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับ).....	56
3.7.3 การทดลองที่ 2 ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ (ชนิดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน รวมถึงตรวจสอบความเร็วกระเดียนท์ ของใบพัดว่าสามารถทำให้ระบบมีการกวนสมบูรณ์หรือไม่).....	59
3.7.4 การทดลองที่ 3 การทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮโดรไซโคลน เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะสมดุลของการดูดซับและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมกับระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดสีย้อม .....	61
3.7.5 การทดลองที่ 4 การทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการไหลของสีย้อมที่ต้องการบำบัด (Q) และปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (m) รวมทั้งศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในระบบ (SRT) และเวลาที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ ( $T_E$ ).....	63

3.7.6 การทดลองที่ 5 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous Operating) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการกำจัดสีย้อม โดยใช้สภาวะที่เลือกจากการทดลองที่ผ่านมา.....	65
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล .....	67
4.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซับ .....	67
4.1.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ .....	68
4.1.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อความสามารถในการดูดซับ 70	
4.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ.....	71
4.1.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ .....	72
4.1.5 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic).....	73
4.1.6 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	76
4.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลน .....	81
4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันจ่ายเข้าต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน ( $P_{inlet}$ ).....	81
4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน ( $D_p$ ) .....	83
4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ( $D_o$ ).....	85
4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ( $D_c$ ) .....	86
4.2.5 เปรียบเทียบการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดโดยใช้ไฮโดรไซโคลนกับการตกตะกอนแบบธรรมดา.....	87
4.3 ผลการศึกษาการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด (Batch Adsorption in Hybrid system) .....	88
4.3.1 จลนศาสตร์ของการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด .....	88
4.3.2 สมการทำนายการดูดซับสีย้อมในระบบไฮบริด .....	91
4.4 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลน .....	95
4.4.1 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous reactor).....	95
4.4.2 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor).....	98

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	104
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.1.1 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด .	104
5.1.2 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดของ ไฮโดร ไซโคลน .....	104
5.1.3 ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในการกำจัดสี ย้อม.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป .....	106
รายการอ้างอิง .....	107
ภาคผนวก.....	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	131

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สมบัติของตัวถูกดูดซับ (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร, 2551) .....	52
ตารางที่ 3.2 สมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในงานวิจัย .....	53
ตารางที่ 3.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 (Punyapalukul, 2004).....	53
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดเฉพาะไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย (ลักษิกา กองวิเชียร, 2556).....	54
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอมของสีย้อมบนพื้นผิวตัวดูดซับ .....	56
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ .....	59
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาในการทดลองที่ 3 .....	61
ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4 .....	63
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5 .....	65
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผง .....	70
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแต่ละปฏิกิริยาทางจลนศาสตร์ .....	74
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยา.....	74
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร .....	75
ตารางที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับ .....	77
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ .....	80
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ.....	80
ตารางที่ 4.8 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกต่างๆของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าแตกต่างกัน .....	82
ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลผลการคำนวณหาความเร็วสุดท้ายในการแยกของอนุภาค .....	87
ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาอันดับสอง.....	89
ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาภายในการดูดซับในระบบไฮบริด .....	91
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความแม่นยำของสมการทำนายผลของแต่ละปริมาณถ่านกัมมันต์.....	93
ตารางที่ 4.13 แสดงการดูดซับในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่อง .....	97
ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้สมการทำนายผล .....	97
ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ .....	99
ตารางที่ 4.16 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีย้อมความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลน้ำเสีย 30 ลิตรต่อชั่วโมง.....	103

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ .....	13
รูปที่ 2.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ .....	14
รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช .....	15
รูปที่ 2.4 เส้นทางการไหลทั้งสามส่วนภายในไฮโดรไซโคลน .....	20
รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไฮโดรไซโคลน .....	23
รูปที่ 2.6 การไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน .....	24
รูปที่ 2.7 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน .....	25
รูปที่ 2.8 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) .....	26
รูปที่ 2.9 การกระจายความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ ) .....	27
รูปที่ 2.10 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ) .....	28
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง .....	38
รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด .....	45
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ .....	46
รูปที่ 3.2 สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5) .....	52
รูปที่ 3.3 รายละเอียดเฉพาะไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก.) 50 และ (ข.) 75 มิลลิเมตร .....	55
รูปที่ 3.4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ ในการทดลองที่ 2 .....	60
รูปที่ 3.5 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 3 .....	62
รูปที่ 3.6 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 4 .....	64
รูปที่ 3.7 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 5 .....	66
รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Black 5 .....	68
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ชนิด Hydrosorb bituminous coal base และ Filtrasorb 200 .....	69
รูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน .....	71
รูปที่ 4.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 2 4 และ 10 กรัมต่อลิตร .....	72
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่เวลา 6 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน .....	72
รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ Filtrasorb 200 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ต่างกัน .....	73
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบข้อมูลการดูดซับจากการทดลองกับแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb ขนาด 12x40 เมช และชนิดผง Shirasagi S-10 .....	77

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอน หรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด .....	79
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอน หรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดผง .....	79
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนที่ความดันจ่ายเข้าต่างกัน .....	82
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ.....	83
รูปที่ 4.12 ผลการวัดขนาดอนุภาคตามเวลาด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	84
รูปที่ 4.13 ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ ก.) ที่เวลา 0 นาที ข.) ที่เวลา 30 นาที ค.) รูปเปรียบเทียบขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ 0 และ 30 นาที .....	85
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลอนและการตกตะกอนแบบโตน.....	88
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮโดรไซโคลอนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 135 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร.....	89
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับในระบบไฮโดรไซโคลอนและในห้องปฏิบัติการ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 135 มิลลิกรัมต่อลิตร .....	90
รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ปริมาณต่างๆ .....	92
รูปที่ 4.18 พล็อตลิโงโซเทอมที่ใช้หาค่าความเข้มข้นสีย้อมที่สภาวะสมดุลสำหรับ สมการทำนายผลของการดูดซับ ( $C_{e,model}$ ) .....	92
รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทำนายผลกับข้อมูลจากการทดลอง.....	94
รูปที่ 4.20 กราฟเบรทท์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 130 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 1 และ 2 กรัมต่อลิตร .....	96
รูปที่ 4.21 กราฟเบรทท์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 130 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร .....	96
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นสีย้อมคงเหลือที่ผ่านระบบไฮบริด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล ของตัวกลางดูดซับ 2.5 2.0 และ 1.25 กรัมต่อนาที.....	98
รูปที่ 4.23 น้ำเสียสีย้อมที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบไฮบริด ที่ $Q=0.5$ ล./นาที $L_s=2.5$ ก./นาที ความเข้มข้นสีย้อม 150 มก./ล.....	99
รูปที่ 4.24 เส้นสมดุลของระบบไฮบริดในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับด้วยวิธีทางกราฟ .....	100
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์กระบวนการดูดซับโดยวิธีทางกราฟ (Graphical method).....	102

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก เป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่ารวมสูงมากประเภทหนึ่ง ซึ่งอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมย่อยที่มีปัญหาการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากกระบวนการผลิตจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมากแทบทุกขั้นตอนในกระบวนการผลิต ซึ่งผลจากการพัฒนาและขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นทำให้เกิดปัญหาตามมาคือ เกิดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในปริมาณมากที่มีสีย้อมหลงเหลืออยู่ สีย้อมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นแม้มีปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจแก่ผู้พบเห็นได้ อีกทั้งสีย้อมยังเป็นสารที่ยากต่อการกำจัดเนื่องจากเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ รวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมบางประเภทมีความเป็นพิษสูงมากและเป็นสารก่อมะเร็ง จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อให้ไม่ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำและผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2545)

สีย้อมรีแอกทีฟมีสัดส่วนการใช้น้ำในปริมาณร้อยละ 20-30 ของตลาดสีย้อมทั้งหมด เพราะสีย้อมรีแอกทีฟใช้เพื่อการย้อมสิ่งทอ ซึ่งใช้ประมาณครึ่งหนึ่งของการใช้เส้นใยในโลก (Papic และคณะ, 2004) สีย้อมในน้ำเสียสามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอนด้วยสารเคมี การดูดซับ และการออกซิเดชัน-รีดักชัน วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการกำจัดมลสารต่างๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเป็นจำนวนมากทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จึงจัดเป็นวิธีที่สามารถลดระดับสีให้อยู่ในปริมาณต่ำๆ ได้ดี การใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีย้อมนั้นจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ พีเอชและค่าความแรงของไอออนของสารละลาย ซึ่งพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีในช่วงพีเอช 6 ถึง 8 และการดูดซับดีขึ้นเพิ่มอุณหภูมิและความแรงไอออนของสารละลาย (Al-Degs และคณะ, 2008)

วัสดุดูดซับมีมากมายหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ชนิดของถ่านกัมมันต์จะแยกตามขนาดออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC) และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีความง่ายในการใช้งานและดูดซับได้เร็วคือสามารถเติมพร้อมกับสารโคแอกกูแลนต์ในถังกวนเร็ว แล้วให้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงไปรวมกับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก แล้วแยกออกด้วยการตกตะกอนหรือการกรองออก แต่ข้อเสียของถ่านกัมมันต์ชนิดผงคือ ยังไม่มีระบบที่แยกถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้ออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการกรองก็



อาจทำให้เกิดการอุดตันในชั้นกรองและส่งผลให้ต้องล้างย้อนระบบบ่อยครั้งขึ้น และเนื่องด้วยข้อจำกัดในเรื่องขนาดอนุภาคของการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอน จึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในงานวิจัยนี้ ในปัจจุบันถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจะใช้ในรูปแบบบรรจุคอลัมน์ซึ่งถือว่ามีความยุ่งยากในการใช้งานเรื่องจากในการออกแบบจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองแบบแบทช์และการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column test) หากความเข้มข้นของน้ำเสียมีความแปรปรวนจะไม่สามารถเพิ่มหรือลดปริมาณถ่านกัมมันต์ได้ทันที และเมื่อคอลัมน์หมดสภาพการใช้งานจำเป็นต้องหยุดการทำงานของระบบเพื่อเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ชุดใหม่ (Islam และคณะ, 2009)

กระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลวมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การตกตะกอน การแยกโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และการกรอง เป็นต้น ไฮโดรไซโคลอนเป็นอุปกรณ์การแยกโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางประเภทหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการแยกของแข็งออกจากของเหลว และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบถูก ไม่มีอุปกรณ์ใดเคลื่อนที่ และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยเมื่อเทียบกับการแยกด้วยถังตกตะกอน อีกทั้งยังช่วยเร่งระยะเวลาในการแยกอีกด้วย โดยที่ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอนขึ้นกับลักษณะเฉพาะทางกายภาพของตัวเรอินไฮโดรไซโคลอน ความแตกต่างของความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของของแข็ง รวมถึงความดันลดที่จ่ายเข้า และความเข้มข้นเฟสของไหล (Puprasert และคณะ, 2004) ซึ่งความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนยังมีค่าสูงการแยกเกิดขึ้นได้ดี แต่ถ้าหากสูงมากเกินไปจะเกิดการไหลล้นตัวจริงขึ้นออกสู่ส่วนทำใสได้ อีกทั้งหากขนาดช่องทางออกด้านล่างมีขนาดเล็กก็จะเกิดการอุดตันบริเวณส่วนกรวยได้ (Saengchan และคณะ, 2009)

จากกระบวนการดูดซับสี้อมด้วยถ่านกัมมันต์และกระบวนการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอนจึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่จะนำเอาสองกระบวนการดังกล่าวมาทำงานร่วมกันเป็นระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนและถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ลดปริมาณความเข้มข้นของสี้อมก่อนทิ้งน้ำลงสู่แหล่งน้ำ ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในกระบวนการดูดซับสี้อม และแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน น้ำเสียที่ปนเปื้อนสี้อมที่เข้ามาจะผ่านกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในถังกวนผสม จากนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วส่งเข้าสู่กระบวนการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะแยกของไหลหรือน้ำออกทางออกด้านบนและแยกถ่านกัมมันต์ออกทางออกด้านล่าง โดยที่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วบางส่วนวนกลับเข้าถังกวนผสมเพื่อใช้งานต่อจนหมดประสิทธิภาพและแยกอีกส่วนหนึ่งที่หมดประสิทธิภาพออกจากระบบ ซึ่งจากแนวคิดข้างต้นจะพบว่าระบบทั้งหมดเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องไม่จำเป็นต้องหยุดเดินระบบเพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออกและแม้ว่าสถานะเดินระบบเปลี่ยน เช่นความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงก็สามารถเพิ่มหรือลดปริมาณถ่านกัมมันต์ได้ทันทีตามข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบแบทช์ ทั้งนี้เนื่องจากระบบดังกล่าวยังมีผู้ศึกษาไม่มาก จึงยังขาดข้อมูลในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพ ทั้งปัจจัยในการดูดซับสี้อมและในการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำด้วยไฮโดรไซโคลอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่จะนำไปสู่การออกแบบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนและถ่านกัมมันต์มาใช้กำจัดหรือลดความเข้มข้นสี้อมก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ได้แก่ ชนิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผง

1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากสารละลาย ได้แก่ ชนิดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน และความดันที่ใช้จ่ายของผสมเข้าไฮโดรไซโคลน

1.2.3 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด ได้แก่ ปริมาณและระยะเวลาที่ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในระบบ อัตราการไหลของน้ำเสีย

1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดมาใช้ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม และหาค่าที่ใช้การเดินระบบที่สอดคล้องกับสภาวะต่างๆ เช่น อัตราการไหลและปริมาณความเข้มข้นของสีย้อม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับทดลอง โดยดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 น้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมที่ใช้เป็นน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นของสีตามต้องการ สีย้อมที่ใช้เป็นสีย้อมรีแอกทีฟโบลัสดำ (Reactive Black 5) จากบริษัท Dystar Thai Ltd.

1.3.3 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 2 ชนิด คือ Filtrasorb 200 ของบริษัท Calgon carbon corporation และ Hydrosorb bituminous coal ของบริษัท Aqua kinetic Ltd. ใช้ตะแกรงแยกขนาด (Molecular sieve) คัดจนได้ขนาด คือ 12x14 16x18 20x24 และ 30x35 เมช (Mesh) และถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 ของบริษัท EnviroChemicals Ltd.

1.3.4 ไฮโดรไซโคลน 2 ขนาด คือ ไฮโดรไซโคลนยี่ห้อ NEYRTEC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทำจากโพลียูเรเทน (Polyurethane) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

1.3.5 ตรวจวัดความเข้มข้นสีย้อมด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร

1.3.6 การพิจารณาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ในการดำเนินการของระบบไฮบริดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการกำจัดสารถูกดูดซับออกจากของไหลด้วยกระบวนการดูดซับและส่วนของการแยกสารดูดซับออกจากของไหลด้วยไฮโดรไซโคลน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.4.2 ทราบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ

1.4.3 ทราบความเป็นไปได้ในการใช้ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) เพื่อกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1.4.4 ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตัวถูกดูดซับ (สีย้อม)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีอิมตัว เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาซีน และพาราฟิน

##### 2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมทำหน้าที่ให้สีติดไปกับผ้าหรือด้ายที่นำมาย้อม คุณสมบัติของสีที่จะติดผ้าหรือด้ายนั้น ต้องติดคงทน ทนต่อแสงแดด สบู่ น้ำ และน้ำยาซักแห้ง ดังนั้นสีย้อมส่วนที่ไม่ติดไปกับเนื้อผ้าจะปนไปพร้อมกับน้ำทิ้ง กลายเป็นน้ำเสียที่ยากต่อการบำบัดเพราะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน (นริชฎา กรวีนันทวงศ์, 2542 และเสกสรรค์ เชี่ยวธัญญกิจ, 2546)

สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่หลายชนิด การเลือกสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ การที่โมเลกุลของสีจะไปติดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น เกิดจากอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์

##### (1) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (hydroxyl) จะยึดอย่างหลวม ๆ กับอะตอมอื่น ๆ ได้ เป็นวาเลนซ์ที่สอง (secondary valency) เช่น การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ เส้นใยและตัวสีเกือบทุกชนิดจะมีกลุ่มไฮดรอกซี

##### (2) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force)

เป็นแรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดกันได้เอง

##### (3) พันธะไอออนิก (Ionic Bonding)

เกิดขึ้นจากการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน อะตอมของธาตุที่ให้อิเล็กตรอนจะทำให้ตัวมันเองมีอิเล็กตรอนลดลง จึงแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกออกมา ส่วนอะตอมที่รับอิเล็กตรอนจะแสดงประจุบวก ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่แตกต่างกันซึ่งเรียกว่า ไอออนิก พันธะไอออนิกมีลักษณะสำคัญคือเป็นพันธะที่แข็งแรง (Strong) แต่เปราะ (Brittle) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง

##### (4) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

เป็นพันธะทางเคมีโดยมีอะตอมสองอะตอมหรือมากกว่าเกาะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุ่ร่วมกัน เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะอื่น เช่น สีรีแอกทีฟจะยึดกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งสามารถยึดได้หนาแน่นและแยกตัวออกจากกันได้ง่าย

## 2.1.2 เคมีของสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

- (1) พันธะคู่สลับ (Conjugated double bonds) โครโมฟอร์และออกโซโครมต่างเชื่อมกับพันธะคู่สลับ ซึ่งเรียกว่า โครโมเจน (Chromogen)
- (2) โครโมฟอร์ (Chromophores) เป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีในกลุ่มไม่อิ่มตัว ยกเว้น  $-NR_3^+$  โครโมฟอร์มีหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ให้สีแก่โมเลกุลของสีย้อม
- (3) ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นกลุ่มข้างเคียงที่เกาะอยู่บนโครโมฟอร์ เป็นตัวที่สร้างลักษณะของความเข้มข้นสี (Intensity) และ/หรือปรับปรุงสมบัติในการดูดติดกับเส้นใยให้กับสีย้อม

ในกรณีที่มีหมู่อื่นๆ มาเกาะแทนไฮโดรเจนอะตอมบนออกโซโครม เช่น หมู่อัลคิล (alkyl group) หมู่อไมด์ (amide group) หรือหมู่อัลคอกซี (alkoxy group) เป็นต้น จะทำให้สีเข้มขึ้นกว่าเดิม หรือในทางตรงกันข้ามทำให้สีอ่อนลง เพราะฉะนั้นสีที่มีโครงสร้างโครโมฟอร์เหมือนกันจะสามารถดัดแปลงให้มีความหลากหลายของเฉดสีได้ นักเคมีสีย้อมอาศัยหลักการนี้ในการสังเคราะห์สีย้อมเฉดสีต่างๆ โดยดัดแปลงหมู่ออกโซโครม

## 2.1.3 สีย้อมที่เลือกสำหรับงานวิจัย

สีย้อมที่เลือกสำหรับงานวิจัยครั้งนี้คือ สีรีแอคทีฟ เหตุผลสำหรับการเลือกสีย้อมชนิดนี้คือ สีย้อมชนิดรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่เมื่อละลายน้ำแสดงประจุเป็นลบ และเป็นสีย้อมที่เมื่อผ่านกระบวนการฟอกย้อมจะมีปริมาณสีย้อมปนเปื้อนในน้ำทิ้งสูงถึงร้อยละ 5-50 ถือว่าเป็นสีย้อมที่ปนเปื้อนมากที่สุด (สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, 2545)

สีย้อมที่เป็นตัวแทนของสีรีแอคทีฟ คือ สีรีแอคทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมและในงานวิจัยเป็นอย่างมาก รวมถึงใช้เป็นวัตถุติดตั้งต้นในการผลิตสีรีแอคทีฟโทนสีอื่นๆ และใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส

## 2.2 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

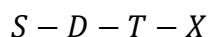
### 2.2.1 สมบัติของสีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่เชื่อมเส้นใยธรรมชาติ เช่น cellulose fiber และสำหรับเส้นใยโปรตีน (protein fiber), เส้นใยไนลอน (nylon fiber) สีรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วตัวสีจะให้ประจุลบ นอกจากนั้นยังมีหลายสี มีความติดทนดี และย้อมง่าย ตัวสีมีฮาโลเจนอะตอมซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ( $OH^-$ ) ของเซลลูโลสได้ในสภาวะความเป็นด่าง

จะเกิดพันธะโควาเลนต์ทำให้สีติดได้ดีมากกว่าสีที่ติดโดยแรงเคมีเชิงฟิสิกส์ (เสกสรร เขียวธัญญกิจ, 2546)

### 2.2.2 โครงสร้างทางเคมี

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยพื้นฐาน 4 กลุ่ม สามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ ดังนี้



โดย	<i>S</i>	คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค ( $-SO_2Na$ ) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์
	<i>D</i>	คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่า กลุ่มโครโมฟอร์
	<i>T</i>	คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์
	<i>X</i>	คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

### 2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ ไม่พบรายงานว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าอาชีพอื่นแต่อย่างใด แต่สารวัตถุพิษที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีหลายประเภทที่มีความเป็นพิษสูงมากและมีหลายตัวที่เป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งเส้นทางการรับสัมผัสของสีย้อมเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ การรับสัมผัสทางจุ่มโดยการสูดดม การสัมผัสทางผิวหนัง และการปนเปื้อนในอาหารเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2546)

ผลกระทบหรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพมีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ปัจจุบันปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งอยู่ที่สีของน้ำทิ้งมากกว่าความเป็นพิษของสีย้อม เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีและเป็นรังเกียจของผู้พบเห็นได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งสรุปได้ดังนี้

- ก่อให้ความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
- ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง เนื่องจากสีย้อมเป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้
- ขัดขวางทางเดินของแสง ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เป็นผลให้การผลิตออกซิเจนลดลง
- สารที่เป็นองค์ประกอบในสีย้อมบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง

จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

## 2.2.4 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นดังนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

- มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เกิดจากแป้ง สีย้อมกรดอะซิติก เส้นใยและด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้สารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะ เป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และยังมีสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปน้ำเสียนี้นี้จะมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดี ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร (จารุทัศน์ มลิสินทะเลข, 2537)
- มีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่าง (alkalinity) สูง พีเอชมีค่าประมาณ 9-12 และค่าความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร พีเอชและค่าความเป็นด่างสูงมาจาก โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต
- มีอุณหภูมิสูง ประมาณ 50 องศาเซลเซียส
- น้ำเสียนี้อ้อมมีความขุ่นสูง จากสีที่ใช้ย้อมผ้า
- มีโลหะหนักเจือปนอยู่ ซึ่งเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยทั่วไปแล้ว ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี
- มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นของเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ
- มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

## 2.2.5 สีของน้ำเสีย

### (1) สีแท้หรือสีจริง (True Color)

หมายถึง สีที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ สารจำพวกที่ทำให้เกิดสีแท้ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอินทรีย์ที่เป็นสารประกอบของสารประกอบทั้งสาม

### (2) สีปรากฏ (Apparent Color)

หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ สีที่ปรากฏเป็นสีที่เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เช่น ฟิซเล็กๆ ในน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ รวมถึงสิ่งไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น ซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย

วิธีที่จะสามารถแยกสีทั้งสองออกจากได้ทำได้โดยใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งสีปรากฏจะตกตอน ส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอน (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2544) และเมื่อกำจัดสีปรากฏออกไปได้จะทำให้เห็นสีแท้ของน้ำได้

สีของน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานย้อมผ้าเกิดจากการใช้สีย้อมในกระบวนการย้อม ซึ่งอนุภาคของสีย้อมจะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย เป็นสาเหตุให้เกิดสีในน้ำเสีย ซึ่งอนุภาคของสีย้อม

ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปได้ด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ดังนั้นสีของน้ำเสียที่เกิดจากอนุภาคสีย่อมจึงเป็นสีแท้ในน้ำเสีย

## 2.2.6 การวัดสี

### 2.2.6.1 วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum Cobalt Standard)

American Public Health Association (APHA) ได้กำหนดวิธีแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานออกสีเหลือง คล้ายน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะเรื่องที่เกี่ยวข้องกับแหล่งน้ำธรรมชาติ เครื่องมือที่ใช้ในหลักการนี้คือ หลอดเปรียบเทียบสีมาตรฐาน (Standard Color Comparison Tubes) หรือหลอดเนสเลอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดสี ข้อดีคือมีราคาถูก แต่ข้อเสียคือจะต้องเตรียมมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการใช้งาน

### 2.2.6.2 วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

เป็นการวัดสีโดยการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (Absorption Maxima) แล้วใช้ความยาวคลื่นนี้วัดค่าสีของน้ำตัวอย่างโดยการวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยที่สีเข้มจะดูดกลืนแสงมาก หรืออัตราการทะลุผ่านของแสงน้อย แล้วอ่านค่าความเข้มของสีได้จากกราฟมาตรฐานที่ทำขึ้นมา (กรณีการ สิริสิงห, 2544)

## 2.3 กระบวนการกำจัดสียอม

สีของน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานย้อมผ้าเกิดจากการใช้สียอมในกระบวนการย้อม ซึ่งอนุภาคของสียอมจะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย เป็นสาเหตุให้เกิดสีในน้ำเสีย ซึ่งอนุภาคของสียอมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปได้ด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องนำกระบวนการบำบัดที่ใช้ในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเข้ามาจัดการ กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสียอมแบ่งได้เป็น 7 กระบวนการ คือ การกำจัดสียอมด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biological) โคแอกกูเลชัน (Coagulation) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon adsorption) แลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane filtration) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) และกระบวนการการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes, AOPs) โดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการทางชีวภาพในการกำจัดสียอม เนื่องจากเป็นตัวเลือกในการประหยัดค่าใช้จ่ายและสียอมจะถูกดูดซับไปยัง แอทิเวเตดสลัดจ์และเหมาะกับการกำจัดสียอมเบสิกมากกว่า เนื่องจากโดยทั่วไปสียอมนั้นมีความเป็นพิษและทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสียอมรีแอทิฟซึ่งมีสมบัติการละลายน้ำสูง ทำให้การดูดซับสียอมไปยังสลัดจ์เกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังนั้นกระบวนการทางชีวภาพจึงยังไม่เพียงพอที่จะกำจัดสียอมให้ ความเข้มข้นต่ำมากได้ (Hai และคณะ, 2007)



การตกตะกอนด้วยสารเคมีเป็นอีกกระบวนการของการกำจัดสีย้อมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปมักใช้ร่วมกับการปรับค่าพีเอชและสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ สารส้ม ปูนขาว เพอร์ริสคโลไรด์หรือเพอร์ริสซัลเฟต เป็นต้น โมเลกุลของสีย้อมจะถูกดูดซับบนอนุภาคของสารตกตะกอน เกิดเป็นตะกอนของสีย้อมจมตัวลงในน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในสีย้อมที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น สีเอลิต สีรีแอกทีฟ ไม่สามารถใช้สารส้มเพื่อตกตะกอนได้ ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนโดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เหลือจะส่งผลเสียต่อกระบวนการในตรีฟิเคชัน

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อกำจัดสีย้อม เนื่องจากการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสีย้อมได้หลากหลายชนิดรวมถึงสีย้อมรีแอกทีฟ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อบำบัดน้ำเสียสีย้อม มีการใช้งานทั้งในรูปแบบถ่านกัมมันต์ชนิดผงหรือถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เนื่องจากคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก มีโครงสร้างเป็นโพรง มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสูง จึงมีประสิทธิภาพมากในการดูดซับสีย้อมทั้งสีเบสิกและสีรีแอกทีฟ โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จะใช้ในสถานการณ์ฉุกเฉินหรือในขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดเพื่อกำจัดสีย้อมที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำให้มีความเข้มข้นต่ำจนไม่เป็นที่น่ารังเกียจ

## 2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง “ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็งนั้น” ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง ของแข็งที่เก็บสะสมสารอื่นไว้บนผิว เรียกว่า “ตัวดูดซับ (adsorbent)” ส่วนสารประกอบที่มาสะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ (adsorbate)” ดังนั้น เพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากขึ้น ตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ การดูดซับจึงแบ่งออกได้ 2 ประเภทตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

### 2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

#### 2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ คือ การดูดหรือดึงตัวถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพ แรงทางกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วของตัวถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างประจุของตัวถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ และแรงดึงดูดระหว่างระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดขึ้นได้ดีมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน เรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)”

#### 2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี จึงต้องการพลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป การดูดซับประเภทนี้มักเกิดขึ้นได้ดีหรือเร็วที่อุณหภูมิสูง และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น มักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)”

#### 2.4.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งจะมีของเหลวห่อหุ้มอยู่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกละลายจะแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ
- 2) การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าไปยังช่องว่างภายในตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
- 3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการการแพร่ทั้งสอง

#### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

##### 2.4.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

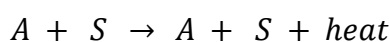
อัตราเร็วในการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด พื้นที่ผิวมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย ขนาดของถ่านกัมมันต์มีผลต่อพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่เกิดจากโพรงภายในมากกว่าพื้นที่ผิวภายนอก

##### 2.4.3.2 ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นขนาดของสารหรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายจึงมีความสำคัญมาก

### 2.4.3.3 อุณหภูมิ

โดยทั่วไปการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นอัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังสมการ



เมื่อ A คือ ตัวถูกดูดซับ

S คือ พื้นที่ผิว

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเปลี่ยน นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยปกติ จะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น แต่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

### 2.4.3.4 ความปั่นป่วน

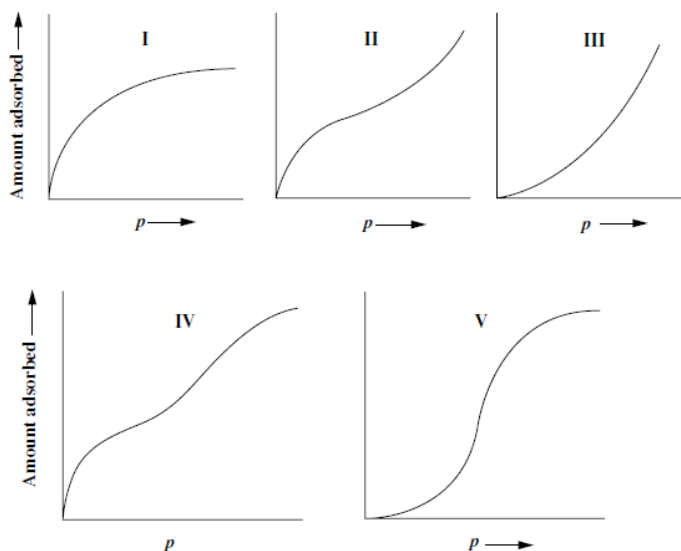
ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ พิล์มน้ำที่อยู่รอบตัวดูดซับจะหนาและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะลดความหนาของชั้นฟิล์มจนเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ดังนั้นอัตราเร็วในการดูดซับจึงขึ้นความปั่นป่วน ทำให้การแพร่ภายนอกและภายใน เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับและการดูดซับ

### 2.4.3.5 พีเอช

เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างแข็งแรง พีเอชในสารละลายส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับไอออนอื่นๆ นอกจากผลกระทบของพีเอชที่มีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนแล้ว ยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่างๆ ด้วย

## 2.4.4 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ

สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) จะเกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับเมื่อตัวถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกสู่สารละลาย จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลที่อัตราการดูดซับของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายตัวออกสู่สารละลาย เรียกจุดนี้ว่า สมดุลของการดูดซับ ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับหรือในสารละลาย และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น สามารถแสดงปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ที่สถานะสมดุลได้ด้วย ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายรูปแบบดังรูปที่ 2.1 โดยที่รูปร่างของไอโซเทอมจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับในขณะที่เกิดกระบวนการดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแรกเป็นการดูดซับซึ่งมีโมเลกุลเพียงชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ และแบบที่เหลือเป็นการดูดซับโดยมีโมเลกุลหลายชั้นบนตัวดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลากหลายรูปแบบเป็นผลจากการพัฒนาความรู้และการสังเกต โดยทั่วไปนิยมใช้กันมากในการอธิบายทฤษฎีของการดูดซับ มักอ้างถึงไอโซเทอม 3 แบบ ดังต่อไปนี้

(1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

โดยมีสมมติฐานว่าโมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ มีโมเลกุลเดียวในบริเวณพื้นที่ที่ตัวดูดซับ มีจำนวนพื้นที่ของบริเวณตัวดูดซับที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว และพลังการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

(2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบทพัฒนามาจากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่คิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียว ให้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้นโดยที่ในแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่มีโมเลกุลชั้นที่ 2 ติดติดเช่นเดียวกับชั้นอื่นๆ ต่อไป

(3) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

## 2.4.5 ไอโซเทอมการดูดซับ (Valencia และ Gloyna, 1972)

ไอโซเทอมการดูดซับที่ใช้อธิบายกระบวนการดูดซับมี 3 แบบ ดังต่อไปนี้

### 2.4.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้

- โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
- พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน กำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
- พลังในการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

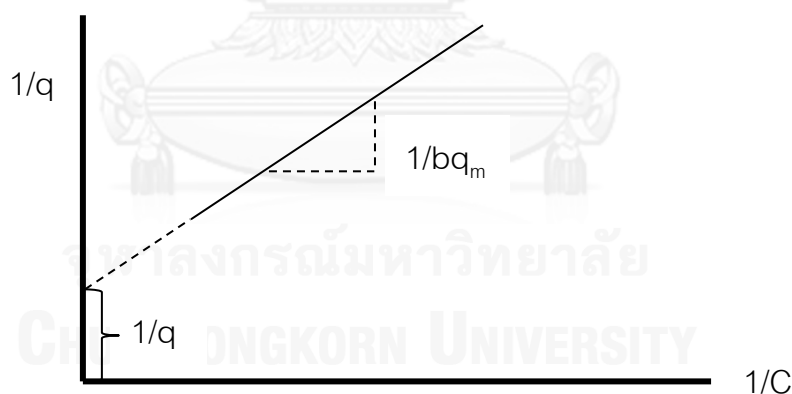
การดูดซับสารละลายโดยตัวดูดซับ แสดงดังสมการ

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right)\left(\frac{1}{bq_m}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C_e$  จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ  $1/bq_m$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/q_m$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

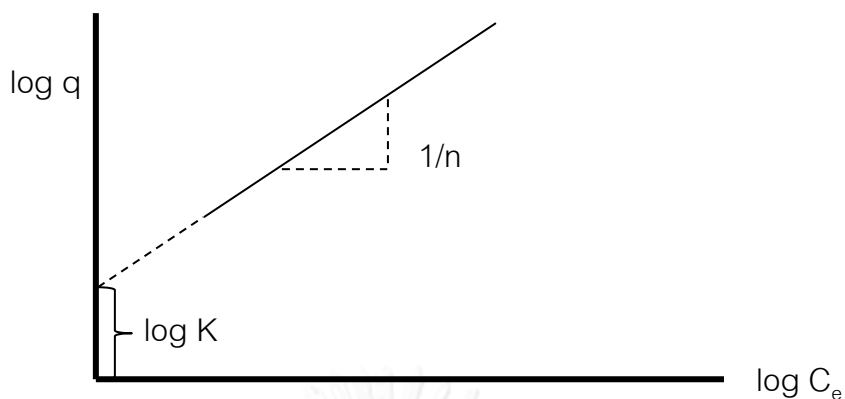


รูปที่ 2.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

### 2.4.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

$$q = K C_e^{1/n} \quad (2.3)$$

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

#### 2.4.5.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเรดลิช-เพทเทอร์สัน (Redlich-Peterson adsorption isotherm) (Redlich และ Peterson, 1959)

เป็นไอโซเทอมที่รวมไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรอนด์ลิชเข้าด้วยกันเป็นสมการเดียวและกลไกการดูดซับเป็นระบบผสมและไม่เป็นไปตามการดูดซับชั้นเดียวในอุดมคติ สมการเป็นดังนี้

$$q_e = \frac{K_R C_e}{1 + a_R C_e^{b_R}} \quad (2.5)$$

โดย	$q$	คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม)
	$q_m$	คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม)
	$C_e$	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร)
	$K$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (ลิตรต่อกรัม)
	$1/n$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช
	$b$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
	$K_L$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตร/กรัม)
	$K_R$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบเรดลิช-เพทเทอร์สัน (ลิตร/กรัม)
	$a_L$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)
	$a_R$	คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบเรดลิช-เพทเทอร์สัน (ลิตร/มิลลิกรัม)
	$b_R$	คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อ $b_R = 1$ จะเป็นสมการแลงเมียร์ แต่เมื่อ $b_R = 0$ จะกลายเป็นกฎของเฮนรี่

### 2.4.6 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Gulnaz และคณะ, 2006)

จลนศาสตร์เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) และกลไก (mechanism) ของปฏิกิริยาเคมี โดยใช้โมเดลในการอธิบายจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ 3 แบบ คือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction) และปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion)

อัตราการเกิดปฏิกิริยา หมายถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต้องเท่ากันไม่ว่าจะคิดจากสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะสามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า กฎของอัตราเร็ว (Rate law) และอันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction) หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสาร

$$\text{Rate law} = k[C]^n \quad (2.6)$$

โดย	C	คือ ความเข้มข้นของสารที่สนใจ
	k	คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็ว ณ อุณหภูมิใดๆ
	n	คือ อันดับของปฏิกิริยา

#### 2.4.6.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction)

คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง หรือเป็นปฏิกิริยาที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว



$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.7)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2.8)$$

ค่า  $k_1$  สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $t$  ซึ่งค่า  $k_1$  คือค่าความชันของกราฟ

#### 2.4.6.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด แต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนเป็นการกระบวนการดูดซับทางเคมีที่เกิดจากประจุของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับจำนวนของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ และจำนวนตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล สมการเป็นดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.9)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.10)$$

### 2.4.6.3 ปฏิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion)

$$q_t = k_p t^{1/2} \quad (2.11)$$

$$k_p = \frac{6q_e}{R} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$q_e$  คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_t$  คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$k_1$  คือ ค่าคงที่ของปฏิริยาอันดับที่ 1

$k_2$  คือ ค่าคงที่ของปฏิริยาอันดับที่ 2

$k_p$  คือ ค่าคงที่ของปฏิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค

## 2.5 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นตัวดูดซับที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งผลิตด้วยการกระตุ้น (Activated) ส่งผลให้พื้นผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเกิดเป็นรูพรุนจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์มีทั้งชนิดเกล็ดและชนิดผง ซึ่งมีพื้นผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 ตารางมิลลิเมตรต่อกรัม รูพรุนแต่ละรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดแตกต่างกัน และความลึกของรูพรุนไม่สม่ำเสมอ

### 2.5.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

#### 2.5.1.1 รูพรุน (Pores)

ผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน อยู่ในลักษณะไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ แบ่งรูพรุนเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ คือ รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร แต่ไม่เกิน 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

#### 2.5.1.2 พื้นที่ผิว (Surface area)

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 450-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีพื้นที่ผิวแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวจริงที่ใช้ในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับตัวถูกดูดซับ



## 2.5.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์แบ่งตามขนาด

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532) ได้กำหนดชนิดของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 ชนิด คือ

### 1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon : PAC)

เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

#### ข้อดีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

- มีราคาถูกกว่าแบบเกล็ดประมาณ 2-3 เท่า
- สามารถเพิ่มหรือลดปริมาณได้ทันทีและสะดวก เพื่อให้สอดคล้องกับความแปรปรวนของคุณภาพน้ำ
- การดูดติดผิวเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจาก โมเลกุลสามารถสัมผัสกับผิวของคาร์บอนได้ง่าย

#### ข้อเสียของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

- ไม่คุ้มค่าที่จะทำรีเจนเนอเรชันเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นจึงเป็นการใช้แบบใช้แล้วทิ้งเลย
- ไม่คุ้มค่าถ้าต้องการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำให้หมดเพราะต้องใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณมาก โดยปกติไม่ควรใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกินกว่า 25-50 mg/l (มันลิน ตันตุล เวศม์, 2539)

### 2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon : GAC)

เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร แต่ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

#### ข้อดีของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

- สามารถฟื้นฟูสภาพได้

#### ข้อเสียของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

- ราคาสูงกว่าชนิดผง
- การเพิ่มหรือลดปริมาณมีข้อจำกัด

## 2.5.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นกรด หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวโดยส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl)
- ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว ได้แก่ ควินิน ฟีนอล คาร์บอกซิเลท

## 2.5.4 การประเมินและการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ (รัชชัย สิงหศิริ ,2548)

ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดเหมาะกับงานต่างประเภทกัน ควรเลือกถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับงาน โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ พิจารณาควบคู่ไปกับลักษณะสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง รวมถึงความเหมาะสมในการควบคุมระบบ

สมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่

- พื้นที่ผิว (Surface Area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับ โดยถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับมาก
- ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปรับคืนสภาพของถ่าน
- ความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน
- ขนาดใช้งาน (Effective Size) คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean Particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity Coefficient) เป็นตัวกำหนดสภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic Condition) ของถังดูดซับ (Adsorption Column)
- ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) จะกำหนดการดูดซับโมเลกุลของน้ำเสีย
- ขนาดของรูพรุน (Pore Size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับโมเลกุลจำเพาะบางชนิด
- แอบริชัน นัมเบอร์ (Abrasion Number) ใช้ประเมินความคงทนต่อการขัดสี
- ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash) แสดงถึงกากของถ่าน
- ความชื้น (Moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต
- ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) กำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number) กำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- ฟีนอลนัมเบอร์ (Phenol Number) ใช้กำหนดความจุของการดูดซับ

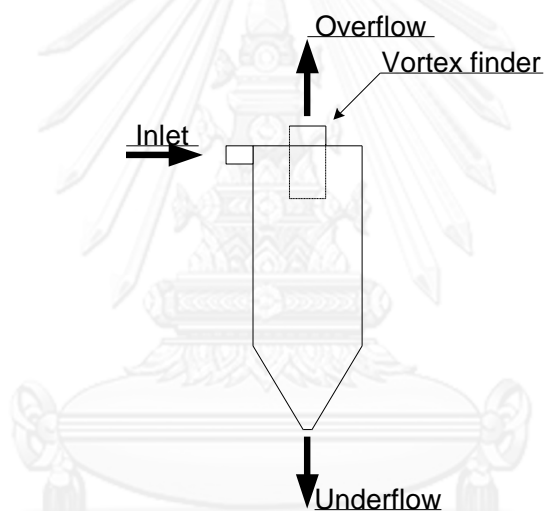
## 2.6 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

### 2.6.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมออกจากกันโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง เช่นแยกของแข็งออกจากของแข็ง ของแข็งออกจากของเหลว และของเหลวออกจากของเหลว ในการทำงานจะไม่มีส่วนใดของไฮโดรไซโคลนเคลื่อนที่ จะแตกต่างจากเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) ที่ต้องหมุนเพื่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเครื่องแยกทั้งสองชนิดนี้ใช้หลักการแยกอนุภาคแบบเดียวกันคือการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยที่ของผสมทั้งสองชนิดนั้นต้อง

มีความหนาแน่นแตกต่างกันและ/หรือขนาดและรูปร่างของอนุภาค ซึ่งการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน โดยทั่วไปจะมีเส้นทางการไหลทั้งหมด 3 ส่วน ดังนี้

- (1) ทางจ่ายเข้า (Feed in) เป็นทางจ่ายเข้าของของผสม อยู่ทางด้านข้างของไฮโดรไซโคลน เพื่อให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค อนุภาคขนาดใหญ่สามารถแยกตัวออกมาใกล้ผนังและหลุดออกไปที่ทางออกด้านล่าง ส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะไหลแยกไปทางออกด้านบน
- (2) ทางออกด้านบน (Overflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคขนาดเล็กหรือความหนาแน่นต่ำ
- (3) ทางออกด้านล่าง (Underflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคขนาดใหญ่หรือความหนาแน่นสูง



รูปที่ 2.4 เส้นทางการไหลทั้งสามส่วนภายในไฮโดรไซโคลน

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนคือ จ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลนผ่านทางช่องทางจ่ายเข้าด้วยแรงดันน้ำ ซึ่งช่องท่อจ่ายเข้าจะมีหน้าตัดเป็นวงกลม โดยจ่ายเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential feed) เมื่อมีการจ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดจะทำให้เกิดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) เพื่อให้เกิดการหมุนเหวี่ยงแล้วแยกการไหลออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ไหลออกด้านล่าง (Underflow) ซึ่งจะนำเอาของแข็งแขวนลอยหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่และ/หรือมีความหนาแน่นสูงออกพร้อมกับมีน้ำบางส่วน และส่วนที่แยกไหลขึ้นด้านบน (Overflow) ซึ่งจะนำน้ำที่ใส และอนุภาคที่มีขนาดเล็กและ/หรือมีความหนาแน่นต่ำกว่าออกมาผ่านท่อที่อยู่ภายใน ท่อดังกล่าวเรียกว่า Vortex finder

ภายในไฮโดรไซโคลน การเคลื่อนที่ของของไหลมีลักษณะการไหลแบบหมุนวน โดยสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ การไหลแบบหมุนวนภายนอก (Outer vortex) และการไหลแบบหมุนวนภายใน (Inner vortex) ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายนอกจะหมุนวนอยู่ด้านนอกติดกับผนังของไฮโดรไซโคลนทิศทางลง ซึ่งทำหน้าที่พาอนุภาคขนาดใหญ่และ/หรือมีความหนาแน่นสูงไหลออกทางส่วนล่างของไซโคลน ในทางกลับกันการไหลแบบหมุนวนภายใน จะหมุนวนขึ้นด้านบนในทิศทางการหมุนเดียวกันที่บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน ซึ่งทำหน้าที่พาน้ำและอนุภาคขนาดเล็กและ/หรือมีความหนาแน่นต่ำกว่าไหลออกช่องด้านบน และที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนจะเกิดแกนอากาศ (Air core) ขึ้น

การไหลที่พบอีกแบบหนึ่งที่มีบริเวณด้านบนของไฮโดรไซโคลน นั่นคือ การไหลลัดวงจร (Short circuit flow) คือของผสมเกิดการไหลวนรอบท่อส่วนปิด Vortex finder และอยู่เฉพาะบริเวณภายในช่วงบนของไฮโดรไซโคลน แล้วไหลลัดออกทางออกด้านบน โดยไม่ผ่านการหมุนวนภายนอกและภายใน ส่งผลให้ไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นทางการไหลลัดวงจร ซึ่งการออกแบบท่อที่ให้ของผสมไหลออกทางด้านบน (Vortex finder) มีความสำคัญต่อการไหลลัดวงจรของของผสมภายในไซโคลน

ไฮโดรไซโคลนสามารถเป็นได้ทั้งอุปกรณ์ทำใส (Clarifier) และอุปกรณ์ทำข้น (Thickeners) นั่นคือ การไหลที่แยกออกทางด้านบน เป็นการเจือจางของของแข็งหรืออนุภาคขนาดเล็กกว่า คือมีปริมาณอนุภาคของแข็งลดลง และการไหลที่แยกออกทางด้านล่างจะมีความเข้มข้นของของแข็งหรืออนุภาคขนาดใหญ่กว่า

ไฮโดรไซโคลนกับภาคอุตสาหกรรม การใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจะต้องคำนึงถึงผลลัพธ์ที่ต้องการ หากของผสมไหลเข้ามีปริมาณมากหรือมีค่าความดันลดยของไฮโดรไซโคลนสูงมาก อาจจำเป็นต้องใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวต่อขนานกัน หรือต่อแบบอนุกรมหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคออกจากกันให้สูงขึ้น

การต่อแบบขนาน เป็นที่นิยมใช้เพื่อรองรับอัตราการไหลของของผสมที่สูงขึ้น ในการต่อไฮโดรไซโคลนแบบขนานนี้อาจใช้ไฮโดรไซโคลนแบบเดียวกันหลายตัวมาต่อแบบขนาน โดยออกแบบให้ของผสมไหลผ่านเข้าไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวเท่าๆ กัน

การต่อแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค เป็นการใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อแบบอนุกรม โดยเริ่มจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นต่ำจะออกในส่วนทางออกด้านบน จากนั้นจะไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวที่สองและเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ โดยประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนตัวที่สองจะน้อยกว่าตัวแรก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่หลุดจากไฮโดรไซโคลนตัวก่อนหน้า อาจออกแบบให้ขนาดของไฮโดรไซโคลนตัวถัดมาเล็กลงเรื่อยๆ ตามลำดับ อนุภาคที่ออกมาจากไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวมีการกระจายตัวของขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกอนุภาคของผสมออกได้ 2-3 ขนาด หรือใช้ในกรณีที่ของผสมมีการกระจายขนาดกว้าง ควรใช้ไฮโดรไซโคลนตัวแรกแยกอนุภาคขนาดใหญ่ออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนตัวถัดมาที่มีขนาดเล็กกว่า

ขนาดของไฮโดรไซโคลนโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรไปจนถึง 2.5 เมตร ขนาดของอนุภาคที่แยกได้อยู่ในช่วง 2-250 ไมโครเมตร (Bradly, 1965) อัตราการไหลที่ใช้อยู่ในช่วง 0.1-7200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และค่าความดันลด (Pressure drop) ระหว่างช่องทางจ่ายเข้ากับช่องทางที่น้ำไหลออก โดยมีค่าที่ใช้ในการทำงานอยู่ในช่วง 0.34-6 บาร์ (Svarovsky, 1984)

สรุปข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลนได้ดังนี้

#### ข้อดีของไฮโดรไซโคลน

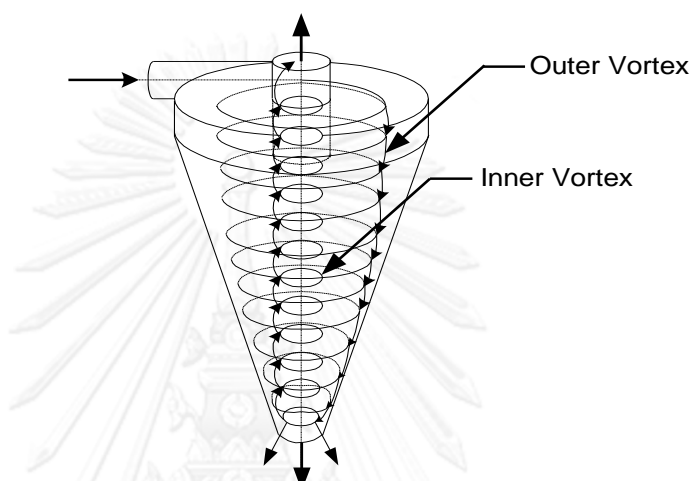
- (1) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายกรณี เช่น ใช้ในการแยกของเหลวออกจากสิ่งเจือปนที่เข้มข้น หรือใช้แยกของเหลวสองชนิดที่ไม่ผสมกัน และยังสามารถใช้แยกแก๊สออกจากของเหลวได้
- (2) ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่ ดังนั้นการดำเนินการและการติดตั้งทำได้ง่าย มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง และไม่ต้องการเครื่องมืออื่นๆ ประกอบการทำงานมาก
- (3) มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกชนิดอื่นๆ จึงประหยัดพื้นที่และใช้เวลากักน้ำน้อย

#### ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

- (1) ไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกขนาดของอนุภาคออกจากกันอย่างสมบูรณ์ชัดเจนได้ มักพบการปะปนของอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคละเอียด หรือมีการปะปนของอนุภาคขนาดเล็กในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดหยาบอยู่เสมอ
- (2) เกิดการผุกร่อนหรือสึกหรอของผิวด้านในของไฮโดรไซโคลนเนื่องจากแรงกระแทกจากของผสมที่จ่ายเข้าไป ซึ่งสามารถป้องกันได้จากการเคลือบผิวภายใน หรือเลือกวัสดุในการผลิตตัวเรือนไฮโดรไซโคลนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน
- (3) แรงเฉือน (Shear force) ที่มีมากภายในไฮโดรไซโคลน บางครั้งอาจส่งผลเสียทำให้กลุ่มอนุภาค (Floc) ที่ผ่านจากขั้นตอนฟลอคกูเลชัน (Flocculation) แตกตัวออกจากกัน
- (4) ใช้พลังงานสูงในการสร้างความเร็วในการไหลเข้า ปรับอัตราการไหลเข้าโดยควบคุมความดันจ่ายเข้า

## 2.6.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน (Fluid Flow and Particle Motion in Hydrocyclone)

การบำบัดหรือการแยกของไหลด้วยไฮโดรไซโคลน อาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในตัวไซโคลน การเคลื่อนที่ของของไหลจะหมุนวนภายในไซโคลน เป็นผลอันเนื่องมาจากการจ่ายของผสมเข้าไปในลักษณะสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไซโคลน

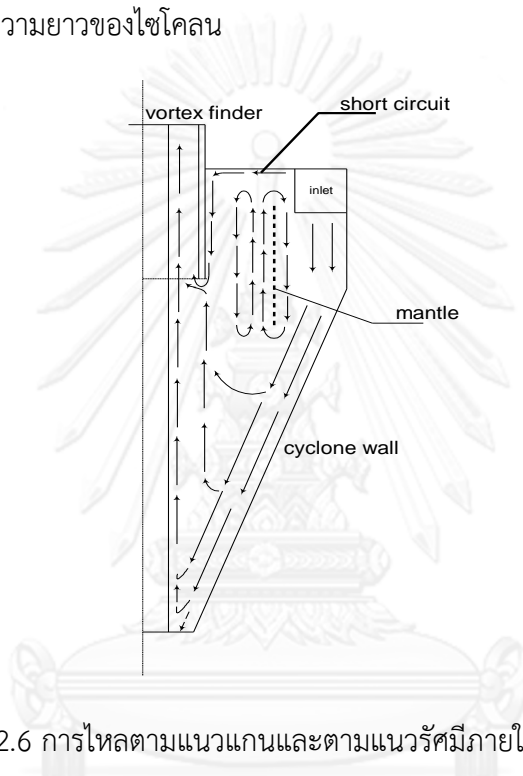


รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไฮโดรไซโคลน

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นลักษณะการไหลแบบหมุนวนและรูปร่างของไฮโดรไซโคลน โดยที่ของไหลจะถูกจ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลนทางช่องจ่ายเข้า ในทิศทางสัมผัสผิวเส้นรอบวงของไซโคลน ในทางปฏิบัติช่องจ่ายเข้าจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลที่จะเข้ามาในไฮโดรไซโคลน ในส่วนบนที่เป็นทรงกระบอกจะถูกปิดด้วยตัวครอบ และมีท่อเพื่อให้ของไหลออกทางด้านบน เรียกว่า Vortex finder มีส่วนที่ยื่นออกมาจากตัวไฮโดรไซโคลน สำหรับในส่วนทางออกด้านล่างจะมีลักษณะเป็นช่องเปิดปลายกรวยเพื่อให้อนุภาคที่ถูกแยกไหลออก

บริเวณด้านในและบริเวณรอบๆ ของท่อจ่ายเข้า การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ของไหลที่ไหลเข้ามาส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในการไหลแบบเกลียววนนอก (Outer vortex) ไปสู่ด้านล่างของกรวยและผลจากแรงหนีศูนย์กลางจากการเคลื่อนที่เป็นเกลียวทำให้อนุภาคขนาดใหญ่และน้ำบางส่วนไหลออกทางช่องเปิดด้านล่างที่ปลายแหลมของกรวย จากนั้นน้ำใสและอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนไหลกลับขึ้นตามแกนกลางของไซโคลน (Inner Vortex) เคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งและไหลออกทาง Vortex finder อีกทั้งยังมีการไหลวนที่เรียกว่า Mantle ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งทำให้เกิดการแบ่งระหว่งการไหลลงที่บริเวณผิวของกรวย และการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณด้านในใกล้แกนกลางของไซโคลน

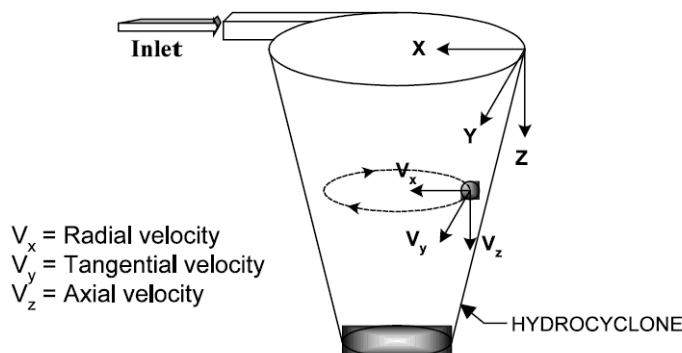
ลักษณะการไหลที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในไฮโดรไซโคลนคือ แกนอากาศ (Air core) ที่อยู่แกนกลางด้านใน แกนอากาศเป็นผลจากการไหลแบบหมุนวนที่ความเร็วของของไหลสูง ทำให้บริเวณแกนกลางมีความดันต่ำ แกนอากาศจะเกิดเป็นปกติเมื่อมีพื้นผิวของไหลที่หมุนอย่างอิสระภายในทรงกระบอกและวิ่งไปตลอดความยาวของไซโคลน ถ้าทางออกทางใดทางหนึ่งหรือทั้งสองต่อออกสู่บรรยากาศโดยตรง จะเกิดการดูดอากาศเข้าไปและเกิดเป็นแกนอากาศด้านในแกนของไฮโดรไซโคลน นอกจากนี้แกนอากาศยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของการไหลแบบหมุนวน (Vortex) หากการไหลแบบหมุนวนดีและการแยกมีประสิทธิภาพสูง แกนอากาศควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ตลอดความยาวของไซโคลน



รูปที่ 2.6 การไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน

### 2.6.3 ความเร็วของการไหลในไฮโดรไซโคลน (Velocity in hydrocyclone)

การจ่ายของผสมเข้าไปภายในไฮโดรไซโคลนในทิศสัมผัสเส้นรอบวง ส่งผลให้ของผสมในไฮโดรไซโคลนมีความเร็วของของไหล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไซโคลน (Tangential velocity) ( $V_t$ ) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ( $V_z$ ) ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity) ( $V_r$ )



รูปที่ 2.7 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน (Puprasert, 2004)

### 2.6.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity, $V_y$ )

ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของไหลที่จ่ายเข้า โดยมีทิศทางสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน และมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลเข้ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้า ดังแสดงในสมการที่ (2.13)

$$V_i = \frac{Q}{A_i} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $V_i$  คือ ความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า

$Q$  คือ อัตราการไหลเข้าของของผสม

$A_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายเข้า

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) และความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า ( $V_i$ ) แสดงได้ดังนี้

จาก  $\alpha = \frac{V_y}{V_i} \quad (2.14)$

ดังนั้น  $V_y = \alpha \cdot V_i \quad (2.15)$

หรือ  $V_y = \alpha \frac{Q}{A_i} \quad (2.16)$

เมื่อ  $\alpha$  คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) และความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า ( $V_i$ ) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 (Bradley, 1965)

จากสมการที่ (2.16) แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อลดขนาดหน้าตัดของช่องจ่ายเข้า

การจ่ายของผสมเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง จะทำให้เกิดลักษณะการหมุนวน 2 แบบ คือ การหมุนวนภายนอกในทิศทางลงตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง และการหมุนวนภายในในทิศทางเดียวกันบริเวณใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน



การหมุนวนของของไหลในอุดมคติ จาก Helmholtz's law ถ้าคำนวณความเร็วสัมผัสด้วยหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) โดยไม่พิจารณาแรงต้านทาน จะได้ว่า

$$V_y \times R = \text{const.} \quad (2.17)$$

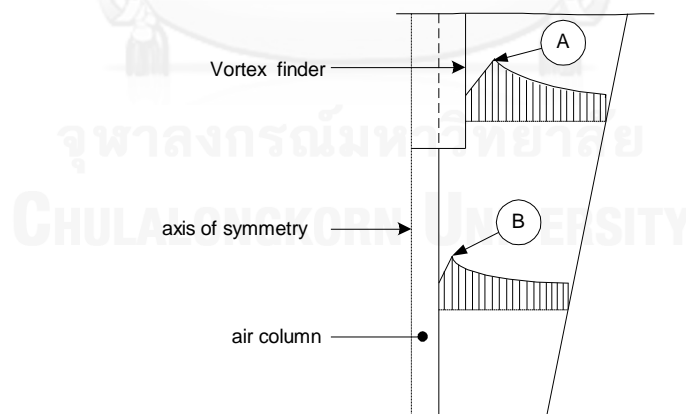
เมื่อ  $V_y$  คือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่รัศมีการหมุนใดๆ  
 $R$  คือ รัศมีการหมุนใดๆ

แต่ในทางปฏิบัติจริง จะมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) จะทำให้ได้ค่าน้อยกว่าสมการข้างต้น ดังนั้น

$$V_y \times R^n = \text{const.} \quad (2.18)$$

โดยที่  $n$  มีค่าระหว่าง 0.5-0.9 และเมื่อคิดว่าการไหลไม่มีแรงเสียดทาน  $n$  จะมีค่าเท่ากับ 1 (Kelsall, 1952 อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติจะเลือกใช้สมการที่ (2.18) เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณ

จากการทดลองของ Kelsall, 1952 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) พบว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีการหมุนลดลงเข้าใกล้แกนอากาศ ซึ่ง Kesall (1952) ได้ทำวัดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง โดยทำการทดลองกับน้ำสะอาดที่ผสมกับอนุภาคอะลูมิเนียม (Aluminium) แล้วใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) วัดตำแหน่งที่มีการโปร่งใส ในไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.8 ทั้งนี้ผลดังกล่าวเป็นค่าความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนในส่วนที่เป็นกรวยเท่านั้น



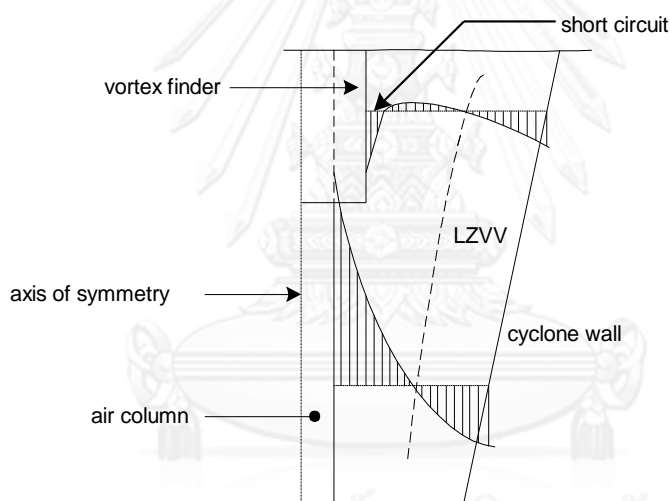
รูปที่ 2.8 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) (Svarovsky, 1984)

จากรูปที่ 2.8 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะสูงขึ้นเมื่อใกล้กับแกนกลางของไซโคลนตามสมการที่ (2.16) แต่ไม่สามารถใช้อธิบายบริเวณรอบๆ Vortex finder ได้ โดยที่ระดับเหนือขอบ Vortex finder ขนาดรัศมีที่ทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุด มีค่าใหญ่กว่ารัศมีของ

Vortex finder ที่จุด A ตามรูปที่ 2.8 และตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุ่น้อยกว่ารัศมีของ Vortex finder ที่จุด B ตามรูปที่ 2.8 จากปรากฏการณ์นี้ แสดงให้เห็นว่าความเร็วสัมผัสไม่ขึ้นกับตำแหน่งในแนวแกนของไซโคลน

### 2.6.3.2 ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, $V_z$ )

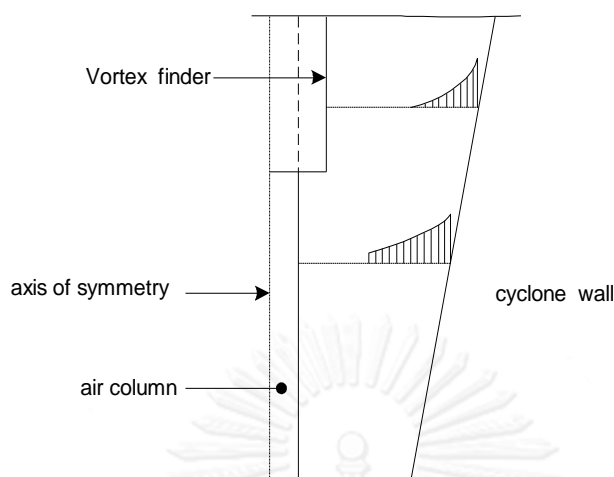
ความเร็วตามแนวแกน คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง การไหลที่ลดลงในส่วนที่หมุนวนภายนอก (Outer vortex) มีทิศทางลงสู่ทางออก ส่วนลง และการไหลที่เพิ่มขึ้นในส่วนที่หมุนวนภายใน (Inner vortex) มีทิศทางขึ้นสู่ทางออกส่วนบน การไหลสวนทางกันทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity, LZVV) ตำแหน่งดังกล่าวอยู่ระหว่างการไหลแบบหมุนวนภายนอกและการไหลแบบหมุนวนภายในซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมีค่ามากที่สุด และที่บริเวณขอบด้านนอกของท่อทางออกส่วนบน (Vortex finder) เป็นบริเวณที่มีการไหลลัดวงจรเกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระจายความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ )

### 2.6.3.3 ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, $V_r$ )

ความเร็วตามแนวรัศมี คือ ความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลน เป็นความเร็วของการไหลภายในไฮโดรไซโคลนที่มีค่าน้อยที่สุดจากความเร็วทั้งสามแบบ และมีความสำคัญน้อยที่สุด ความเร็วตามแนวรัศมีมีค่าขึ้นกับระยะห่างจากแกน ดังนั้นความเร็วตามแนวรัศมีจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณเหนือขอบของท่อทางออกส่วนบน ใกล้เคียงของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ )

#### 2.6.4 กฎของสโตค (Stoke's law)

กฎของสโตคเป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วของอนุภาคในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการและอุปกรณ์การแยกต่างๆ เช่น ถังตกตะกอน โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม และอนุภาคตกตะกอนด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ในของไหลจะเกิดแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ คือ แรงต้าน (Drag force) และแรงต้านจากความหนืดของของเหลว (Viscosity)

การหาความเร็วการแยกอนุภาค จะใช้เพื่อทำความเข้าใจกระบวนการแยก และบอกถึงความเป็นไปได้ในการแยกอนุภาคออกจากน้ำ โดยความเร็วของการตกตะกอนสามารถหาได้จากสมการกฎของสโตค (Stoke's law equation) (Metcralf และ Eddy, 2003)

$$V_p = \frac{g(\Delta\rho)d_p^2}{18\mu} \quad (2.19)$$

- เมื่อ  $V_p$  คือ ความเร็วของการตกตะกอน (Terminal velocity) หน่วย เมตรต่อวินาที  
 $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>  
 $\Delta\rho$  คือ ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
 $d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) หน่วย เมตร  
 $\mu$  คือ ความหนืดทางพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) หน่วย นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร

ตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค มีดังนี้

1. ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นที่นิยมใช้มากในถังตะกอนในขั้นตอนการบำบัดน้ำ สำหรับอุปกรณ์การแยกอื่นๆ สามารถเพิ่มค่าความเร่งนี้เพื่อเพิ่มค่าความเร็วการตกตะกอน ( $V_p$ ) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในไฮโดรไซโคลอน ความเร่งหนีศูนย์กลางจะมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมาก ซึ่งความสัมพันธ์ของความเร่งภายในไฮโดรไซโคลอนกับความเร่งแรงโน้มถ่วงสามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert และคณะ, 2004; McCabe และคณะ, 1993)

$$\zeta = \frac{v_y^2}{R \cdot g} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือ ความเร่งแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลอน

(Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone)

$v_y$  คือ ความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน หน่วย เมตรต่อวินาที

$R$  คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลอน (บริเวณที่เป็นทรงกระบอก) หน่วย เมตร

2. ความแตกต่างความหนาแน่นของเฟสทั้งสอง ( $\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$ ) คือ ผลต่างของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ( $\rho_p$ ) และความหนาแน่นของน้ำ ( $\rho_w$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับกฎของสโตคที่ต้องการแยกเฟสทั้งสองออกจากกัน ในการแยกของแข็งออกจากของเหลวด้วยไฮโดรไซโคลอน จะเกิดขึ้นได้ความหนาแน่นของเฟสทั้งสองต้องแตกต่างกัน หากความหนาแน่นของเฟสทั้งสองไม่มีความแตกต่าง ( $\Delta\rho = 0$ ) จะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาค ( $V_p$ ) มีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (2.19) แสดงว่าไม่สามารถทำการแยกเฟสทั้งสองออกจากกันได้ ดังนั้นการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอนจะเกิดขึ้นได้เมื่อความหนาแน่นของเฟสทั้งสองแตกต่างกัน

3. ขนาดของอนุภาคหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง ( $d_p$ ) หรือ ตัวแปรนี้อยู่ในรูปยกกำลังสอง หมายความว่าถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ความเร็วในการแยก ( $V_p$ ) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถเพิ่มขนาดของอนุภาคได้ ทำให้ไฮโดรไซโคลอนแยกได้ดีขึ้น

4. ความหนืดของของไหล ( $\mu$ ) ส่งผลในทางตรงกันข้ามต่อความเร็วในการแยกอนุภาค ( $V_p$ ) หากค่าความหนืดของของไหลสูงจะส่งผลให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ แต่ถ้าความหนืดของของไหลมีค่าต่ำจะส่งผลให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง ซึ่งค่าความหนืดสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหล โดยที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความหนืดของของไหลมีค่าต่ำ ดังนั้น เพื่อเพิ่มค่าความเร็วในการแยกอนุภาคควรให้ความหนืดของของไหลมีค่าต่ำและมีอุณหภูมิสูง

## 2.6.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

### 2.6.5.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนทรงกระบอกหรือส่วนฐานของกรวย เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในแง่ของขนาดตัด (Cut size) โดยให้อัตราการไหล (Q) คงที่ พบว่าขนาดตัด ( $d_{50}$ ) และความดันลด ( $\Delta p$ ) มีความสัมพันธ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน ( $D_c$ ) ดังนี้

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2.21)$$

$$\Delta p \propto D_c^y \quad (2.22)$$

โดยที่  $x$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.36-1.52 และ  $y$  มีค่าอยู่ระหว่าง -3.6 ถึง -4.1 (Bradley, 1965) ซึ่งถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเล็ก ขนาดอนุภาคที่แยกออกมาจะเล็กตามไปด้วย และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนใหญ่ขึ้น ค่าความดันลดมากขึ้นเช่นกัน

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.21) และ (2.22) เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลคงที่ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) และขนาดตัด ( $d_{50}$ ) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนที่ความดันลดคงที่ เป็นดังนี้

$$Q \propto D_c^z \quad (2.23)$$

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2.24)$$

โดยที่  $z$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 2.0 และ  $x$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.41-0.5 (Bradley, 1965) แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลงทำให้ขนาดตัดลดลงด้วย นั่นคือไฮโดรไซโคลนสามารถคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กลงได้อีก

### 2.6.5.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล (Aperture diameters)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลมีความสำคัญมากสำหรับการออกแบบและควบคุมการทำงานของไฮโดรไซโคลน เพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (Feed:  $D_i$ ) ช่องทางออกส่วนบน (Overflow:  $D_o$ ) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow:  $D_u$ ) โดยที่ขนาดของ  $D_i$  และ  $D_u$  จะเป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคและความดันลดของการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน ส่วนขนาดของ  $D_o$  เป็นตัวกำหนดสัดส่วนอัตราการไหล (Flow split ratio)

ขนาดของช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) ควรจะออกแบบให้อัตราโมเมนตัม (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงสุด เพื่อให้ความเร็วเฉลี่ยที่ช่องจ่ายเข้าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเร็วสัมผัสที่รัศมีเฉลี่ยของทางเข้า (Mean radius of entry) (Bradley, 1965) ซึ่งการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้าส่งผลให้โมเมนตัมเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง ดังนั้นในการออกแบบขนาดช่องจ่ายเข้าควร

เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุด อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ (Capacity) ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค (Separation efficiency) และความดันลดของไฮโดรไซโคลอน

Chaston, 1958 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ได้ศึกษาขนาดที่เหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) ซึ่งค่าที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับและใช้กันทั่วไป คือ  $D_i/6$  ถึง  $D_i/7$  เมื่อ  $D_c$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน

ขนาดของช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนมากกว่าขนาดของช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) เนื่องจากสองสาเหตุสำคัญ คือ การไหลลัดวงจร และในกรณีขนาดของช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZVV

การไหลลัดวงจร คือ การไหลที่นำอนุภาคหยาบไหลออกทางทางออกด้านบน (Overflow) เป็นผลจากการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกส่วนบน ถ้ารัศมีด้านบนของช่องทางออกส่วนบนกว้างกว่าตำแหน่งที่มีความเร็วสัมผัสสูงสุด อนุภาคที่อยู่ในเส้นทางการไหลลัดวงจร จะไหลกลับเข้าสู่บริเวณของการเพิ่มความเร็วสัมผัสภายในไฮโดรไซโคลอนและเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ไปตามขอบด้านล่างของ Vortex finder ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการแยกอนุภาคออกจากของไหลได้อีก ในทางตรงกันข้ามถ้ารัศมีของช่องทางออกส่วนบนมีขนาดเล็กกว่าตำแหน่งที่เกิดความเร็วสัมผัสสูงสุด โอกาสที่อนุภาคจะไหลย้อนกลับมาหมุนวนอีกครั้งก็จะน้อยลงไป ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนลดลงด้วย

กรณีที่ขนาดของช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZVV (Locus of Zero Vertical Velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วภายในไฮโดรไซโคลอนเป็นศูนย์ โดยมีขนาดประมาณ 4.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลอน ( $4.3D_c$ ) เป็นเหตุให้ลักษณะการไหลที่ควรเป็นตามปกติลดลงในการไหลตามแนวรัศมี ทำให้อนุภาคไหลเกิดการไหลลัดวงจรแยกออกไปทางด้านบนโดยไม่ผ่านลงมาที่ตัวไซโคลอน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุด สามารถพิจารณาจากลักษณะการไหล โดยมีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $D_c/2.3$  ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ  $D_c/8$  สำหรับค่าที่ทำให้มีปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ออกที่ช่องทางด้านบนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $D_c/7$  และขนาดช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) ควรจะใหญ่กว่าช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) อาจอยู่ในช่วง  $D_o=D_i$  ถึง  $1.6D_i$  และเพื่อป้องกันการเซาะผนังไซโคลอนจากการจ่ายเข้าไป นอกจากนี้ ค่า  $2D_i+D_o$  ควรน้อยกว่า  $D_c$  อ้างอิงจาก Bradley (1965) สำหรับความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามแสดงดังสมการที่ (2.25)

$$2D_i + D_o = 0.4 - 0.6D_c \quad (2.25)$$

สมการความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามสำหรับไซโคลอนขนาดเล็กคือ

$$2D_i + D_o = 0.35 - 0.7D_c \quad (2.26)$$

โดยทั่วไปเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่าง ( $D_u$ ) จะเป็นลักษณะที่ปรับเปลี่ยนได้ เพื่อควบคุมอัตราการไหลออกด้านล่าง ดังนั้นค่า  $D_u$  จึงขึ้นกับลักษณะการใช้งานมากกว่าที่จะเป็นค่ากำหนด

ปริมาณอัตราการไหลทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนที่น้อยที่สุด จะเท่ากับปริมาณของแข็งที่แยกออกมารวมกับปริมาณของไหลที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาค ดังนั้น จึงขึ้นกับการใช้งานและการกระจายขนาดของอนุภาคในเส้นการไหลด้านล่าง (Underflow)

โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลอน ( $D_u$ ) จะอยู่ในช่วง  $D_c/10$  ถึง  $D_c/5$  และควรมีค่า  $D_u = D_c/3$  เมื่อ  $D_o = D_c/5$  ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ซึ่งจะให้ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเข้า (Feed flow rate) กับอัตราการไหลออกที่ช่องทางด้านล่าง (Underflow flow rate) มีค่าประมาณร้อยละ 10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกส่วนล่าง ( $D_u$ ) อาจถือได้ว่าไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของไซโคลอนหรืออาจมีน้อย (Kelsall, 1960 อ้างถึงใน Bradley, 1965) ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนลดลงเล็กน้อยเมื่อ  $D_u$  ลดลง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความดันลดสำหรับไซโคลอนขนาดใหญ่ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางต่างๆ ใหญ่ตามไปด้วย ส่วนไซโคลอนขนาดเล็ก จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาด  $D_u$  เมื่อ  $D_u$  มีค่าประมาณ  $D_c/7$

### 2.6.5.3 ความยาว ขนาดและรูปร่างของช่องน้ำออกส่วนบน (Vortex finder dimensions)

Vortex finder เป็นท่อสำหรับให้น้ำใสไหลออกทางด้านบนและป้องกันการไหลล้นของอนุภาคที่ไหลมาทางท่อทางเข้าจะเคลื่อนที่ลงตามผิวด้านนอกของ Vortex finder และลงไปในส่วนของตัวเรือนไฮโดรไซโคลอน โดยที่ความยาวของ Vortex finder ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด ( $d_{50}$ ) Vortex finder ที่ยาวจะทำให้อนุภาคมีโอกาส (เวลา) อยู่ในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบเพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้อนุภาคขนาดละเอียดที่ควรจะไหลออกทางช่องทางออกส่วนบนพร้อมน้ำใส กลับไหลย้อนลงมาออกทางช่องทางออกด้านล่าง ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดละเอียดจึงลดลง ให้กรณีที่ Vortex finder ความยาวสั้นเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคขนาดหยาบที่ควรจะตกลงด้านล่าง ทำให้อนุภาคมีโอกาสเกิดการไหลล้นออกทางออกด้านบนมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาอยู่ในไฮโดรไซโคลอนน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคลดลงดังนั้นความยาว Vortex finder ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของกลุ่มอนุภาคที่จ่ายเข้าและจุดตัด (Cut-point) ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายขนาดนั้นๆ

แต่มีการทดลองที่ให้ผลตรงกันข้าม คือมีการทดลองใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ในโรงงาน โดยใช้ไซโคลนขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว ทำการแยกของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ด้วยความดันต่ำ พบว่าความยาวของ Vortex finder ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน อาจอธิบายได้ว่า เกิดจากการที่อนุภาคตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้อนุภาคไหลออกจากเส้นการไหลลัดวงจรมาเข้าสู่การไหลแบบปกติภายในไฮโดรไซโคลนได้

เป็นการยากที่จะระบุค่าที่เหมาะสมของความยาว Vortex finder โดยปกติจะให้มีระยะตามแนวแกนของไซโคลนให้พอเพียงระหว่างระดับท้องของช่องทางจ่ายเข้ากับส่วนปลายของ Vortex finder และโดยทั่วไปไม่ควรให้ส่วนปลาย Vortex finder อยู่ที่ระดับเดียวกับท้องท่อจ่ายเข้า อีกทั้งไม่ควรให้มีระดับอยู่ใกล้กับบริเวณหน้าตัดที่ต่อระหว่างส่วนทรงกระบอกและส่วนกรวย เนื่องจากทั้งสองบริเวณนี้มีการกระจายปั่นป่วน อาจทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ปั่นไปที่ทางออกด้านบน (Overflow) ได้

อีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพไฮโดรไซโคลนคือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผนังด้านนอกของ Vortex finder จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลง เนื่องจากเกิดการไหลลัดวงจรกับตำแหน่งที่มีความเร็วสัมผัสตามแนวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนสูงสุด แต่การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกส่วนบน ( $D_o$ ) ก็มีข้อดี เมื่อออกแบบให้เส้นผ่านศูนย์กลางของผนังด้านนอกของ Vortex finder ใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุด โดยค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังด้านนอกของ Vortex finder ที่เหมาะสมไม่ควรเกิน  $D_c - 2D_i$  และความยาวของ Vortex finder ควรมีค่าเท่ากับ  $D_c/3$

#### 2.6.5.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน (Body dimension)

ไฮโดรไซโคลนประกอบด้วยส่วนหลักสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นทรงกระบอกและส่วนที่เป็นทรงกรวย หรืออาจมีส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมได้ การเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของไฮโดรไซโคลนมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย จึงมีการทำไฮโดรไซโคลนแบบไม่มีส่วนทรงกระบอก หรือการทำไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กโดยไม่มีส่วนกรวยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนหน้าตัดของไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยเล็กๆ มีผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังคงมีการทำส่วนทรงกรวยเพื่อช่วยในแง่เชิงการผลิตไซโคลน ซึ่งโดยทั่วไปความยาวของส่วนกรวยจะอยู่ในช่วง  $2/3D_c$  ถึง  $D_c$

การเพิ่มความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน คือการเพิ่มความยาวหรือการลดมุมของส่วนทรงกรวยของไฮโดรไซโคลน ส่งผลให้ความจุ (Capacity) และประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น (Dahlstrom, 1949 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 116) มีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวย 9 องศาและ 20 องศา ความยาวไซโคลน  $9^{9/16}$  นิ้ว กับ  $19^{3/8}$  นิ้ว และ  $19^{5/6}$  นิ้ว พบว่าที่ความจุเดียวกัน ไฮโดรไซโคลนที่ยาวกว่าค่าความดันลด (Pressure drop) จะลดลงครึ่งหนึ่ง ในขณะที่เมื่อมุมกรวยเพิ่มจาก 9 องศาเป็น 20 องศา โดยที่ความยาวทั้งหมดเท่าเดิม พบว่ามุมไม่ได้ทำให้ความดันลดต่อความจุเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ณ ความดันลดใดๆ เมื่อความยาวมากขึ้น ความจุเพิ่มขึ้น



เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพไฮโดรไซโคลน ระหว่างมุม 9 องศาและ 20 องศา พบว่าที่ อัตราการไหลเดียวกัน มุม 20 องศาให้ขนาดตัด ( $d_{50}$ ) เล็กกว่า ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหล และจากการสังเกตค่าขนาดตัดที่เปลี่ยนไป พบว่า ที่ค่าความดันลดที่กำหนดไว้ นั้น ไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา จะให้ปริมาณอัตราการจ่ายเข้าสูงกว่าโดยมีประสิทธิภาพการแยก เท่ากัน ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนมุมในช่วง 9 องศา ถึง 20 องศาไม่ส่งผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพ ที่ความดันลดเดียวกัน (Bradley, 1960 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 117)

Dahlstrom (1949 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 118) แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยการเพิ่มความยาวที่อัตราการไหลเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดมุมกรวยลงจาก 45 องศา ถึง 15 องศา Rietema (1961 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 118) กล่าวว่า สัดส่วนระหว่าง ส่วนทรงกระบอกกับส่วนกรวยไม่ควรมากเกินไป โดยแนะนำว่าความยาวทั้งหมดของไซโคลนที่เป็นไปได้ ควรมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน ( $L/D_c$ ) = 5 และมีมุมกรวยเล็กกว่า 30 องศา

Fontein (1962 อ้างถึงใน Bradley, 1965) แนะนำว่าส่วนกรวยควรจะสั้นเท่าที่เป็นไป แต่ก็ ต้องคงไว้เพื่อสะดวกในการจ่ายของผสมเข้าไป เมื่อคำนึงถึงความยาวของตัวไซโคลน พบว่ามุมกรวยที่ ถือว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 15 องศา แต่ถ้าไซโคลนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 และ 15 มิลลิเมตร) ควรจะมีมุมกรวยประมาณ 9 องศาถึง 10 องศา

อย่างไรก็ตามขนาดมุมกรวยและความยาวของไซโคลนเป็นตัวแปรที่คำนึงถึงน้อยที่สุดในการ ออกแบบ เนื่องจากไม่มีผลสรุปแน่นอนว่าการเปลี่ยนความยาวและมุมกรวยส่งผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ไซโคลนที่มีส่วนที่เป็นทรงกระบอกยาว มุมกรวย 20 องศา โดยมีส่วน กรวยยาวเท่ากับไซโคลน 9 องศา ไม่ได้ส่งผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

กรณี que เลือกใช้กรวยมุมกว้างจะใช้ในไฮโดรไซโคลนสำหรับการทำใส (Classifier) หรือทำ ความสะอาด (Washer) มีสองสาเหตุด้วยกันคือ ไซโคลนมุมกว้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันที่ปลาย กรวยน้อยกว่า และอีกสาเหตุคือ ความดันลดที่ใช้กับไซโคลนมุมกว้างที่อัตราการไหลเดียวกัน จะให้ ขนาดตัด ( $d_{50}$ ) เล็กกว่าไซโคลนที่มีมุมแหลม และมีการทดลองในแง่การใช้ไซโคลนเล็กๆ โดยมี ช่องทางจ่ายเข้าเป็นแบบสัมผัส (tangential inlet) ปรากฏว่าเหมาะกับการใช้ในการคัด (Classification) ตามขนาดที่ต้องการได้ดี

#### 2.6.5.5 ขนาดและลักษณะของช่องท่อจ่ายของผสมเข้าไฮโดรไซโคลน

ช่องท่อจ่ายเข้า (Feed inlet) สามารถมีรูปร่างได้หลายแบบและหลายตำแหน่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพของไซโคลนไม่มากนัก โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่ด้านยาวขนานกับแกนของไซโคลนจะ ดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อช่องเปิดทั้งสองมีพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากัน และควรมี ความยาวต่อความกว้างเป็น 2:1 (Kesall, 1953 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 119) อย่างไรก็ตาม ช่องทางเข้าที่ยาวกว่าและเป็นเหลี่ยมยุ่งยากในด้านการผลิต ดังนั้นโดยส่วนใหญ่ไซโคลนจึงยังคง รูปร่างทางเข้าเป็นวงกลมเอาไว้

ชนิดของช่องท่อจ่ายเข้าส่วนใหญ่จะได้รับความสนใจในไซโคลนสำหรับแยกแก๊สมากกว่าไซโคลนของของไหล ซึ่งมีผลการวิจัยไซโคลนขนาด 3 นิ้ว พบว่าลักษณะต่างๆกันไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความดันลด

ตำแหน่งของท่อจ่ายเข้าควรได้ระดับกับแผ่นปิดด้านบนของไซโคลนซึ่งมีที่จำกัด บริเวณที่มีปัญหาหรือเรียกว่า Dead space เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจรเป็นปกติ แต่ไม่ควรมีมากเกินไปร้อยละ 15 ของอัตราการไหลทั้งหมด

มุมของช่องท่อจ่ายเข้า ส่งผลกับอัตราการจ่ายของผสมที่มีอนุภาคขนาดหยาบ ซึ่งส่งผลในเรื่องบริเวณที่เกิดการลัดวงจร ที่เกิดขึ้นเหนือช่องทางจ่ายเข้าภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการจ่ายของผสมไหลเข้าไปในเส้นการไหลลัดวงจร แต่สำหรับในไซโคลนขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องสนใจมุมของทางจ่ายเข้าแต่อย่างใด

#### 2.6.5.6 สรุปผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อไฮโดรไซโคลน

1. เส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนและอัตราการจ่าย ซึ่งไซโคลนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ขนาดตัดของอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย
2. การลดอัตราการจ่ายและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (Overflow) จะทำให้ขนาดตัดเล็กลงแต่ความดันลด (Pressure drop) เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องท่อจ่ายเข้าที่เหมาะสมโดยที่ขนาดตัดและความดันลดน้อยที่สุด ควรมีค่า  $D_i = D_c / 3.5$  และ  $D_o = D_c / 3$
3. การเพิ่มความยาวของท่อยื่นสำหรับช่องทางออกส่วนบน (Vortex finder) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กลดลง ความยาวที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานแต่ควรอยู่ในช่วงระหว่าง  $D_c / 2.5$  ถึง  $D_c / 3$  ความหนาของผนังด้านนอก ที่ฐานของช่องทางออกส่วนบนหนากว่าส่วนปลายเนื่องมาจากกรรมวิธีการผลิต และเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
4. ไซโคลนยาวทำให้มีอัตราการจ่ายผ่านไซโคลนสูง (ไม่คำนึงถึงสัดส่วนความยาวของส่วนกรวยและทรงกระบอก) รวมถึงไม่ส่งผลต่อขนาดตัดเมื่อความดันคงที่ มุมของกรวยไม่ควรมีขนาดเกินกว่า 20 องศา ยกเว้นในกรณีที่เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายกรวย
5. ช่องทางจ่ายเข้าที่เป็นสี่เหลี่ยม และมีด้านยาวขนานกับแกนไซโคลน ความยาวที่เหมาะสมของด้านยาวควรมีขนาดเป็นสองเท่าของด้านกว้าง
6. ช่องท่อจ่ายเข้าควรมีผนังเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนปิดด้านบนของไซโคลน

7. การป้องกันการสึกกร่อนที่จะเกิดขึ้นภายในไซโคลน ควรมีการป้องกันการกัดกร่อนที่บริเวณฐานของช่องทางออกส่วนบน (Vortex finder) และส่วนปลาย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบหรือมีการสวมปลายของกรวย

### 2.6.6 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน (Separation efficiency)

ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยไฮโดรไซโคลน พบว่าไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้อย่างสมบูรณ์ จะมีอนุภาคบางส่วนหลุดออกไปพร้อมกับน้ำใสที่ทางออกด้านบนด้วยเสมอ ในการแสดงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนสามารถแสดงได้สองแนวทาง โดยแนวทางแรกจะพิจารณาถึงการแยกมวลของแข็ง ได้แก่ ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) และ ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency) ส่วนแนวทางที่สองจะพิจารณาที่ขนาดของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลนหรือเรียกว่าขนาดตัด (Cut size)

#### 2.6.6.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency, Mass recovery, Retention)

ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว ซึ่งจะพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคของแข็งที่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) กับปริมาณอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน (Feed in) สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.27)$$

$$M_u = Q_u \cdot C_u \quad (2.28)$$

$$M = Q_f \cdot C_f \quad (2.29)$$

โดยที่  $E_T$  คือ ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

$M_u$  คือ มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow)

$M$  คือ มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed inlet)

$Q_u$  คือ อัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow)

$C_u$  คือ ความเข้มข้นของของผสมที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

$Q_f$  คือ อัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed in)

$C_f$  คือ ความเข้มข้นของของผสมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

ในกรณีที่ความเข้มข้นของของผสมที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow) เท่ากับความเข้มข้นของของผสมที่จ่ายเข้า ( $C_u=C_f$ ) แสดงว่าไม่เกิดการแยกอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน นั่นคือไฮโดรไซโคลนทำหน้าที่เพียงแบ่งการไหล (Flow split) เท่านั้น นั่นคือ  $C_u=C_f$

จากสมการที่ (2.27)

$$E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_u \cdot C_u}{Q_f \cdot C_f} \quad (2.30)$$

แทน  $C_u=C_f$  จะได้ว่า

$$E_T = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.31)$$

เมื่อแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง ( $Q_u$ ) หาดด้วยอัตราการไหลเข้า ( $Q_f$ ) พบว่ามีค่ามากกว่าศูนย์ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถใช้ประสิทธิภาพรวมมาแสดงประสิทธิภาพที่แท้จริงของไฮโดรไซโคลอนได้ ดังนั้นจึงมีการนิยามประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนที่คำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ซึ่งเรียกว่าประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

#### 2.6.6.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

ประสิทธิภาพลด คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอน โดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) เนื่องจากการแยกในไฮโดรไซโคลอนมีจุดประสงค์ที่ต้องการให้อนุภาคของแข็งทั้งหมดออกทางออกด้านล่าง และมีเพียงน้ำใสในส่วนทางออกด้านบน แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ เนื่องจากมีของเหลวบางส่วนออกทางออกด้านล่างด้วยเสมอ จึงต้องนำสัดส่วนของของเหลวมาคำนวณประสิทธิภาพด้วย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพรวม (total efficiency) น้อยลงและสอดคล้องความเป็นจริงมากขึ้น จึงนิยมใช้ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ในการแสดงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการ

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $E'_T$  คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลอน

$E_T$  คือ ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอน

$R_f$  คือ สัดส่วนการแบ่งการไหลของอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างกับที่จ่ายเข้า

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.33)$$

ในกรณีที่ไม่มี การแยกอนุภาคเกิดขึ้น ( $C_u=C_f$ ) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนมีค่าเป็นศูนย์ สามารถแสดงได้ด้วยสมการของประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ดังนี้

จากสมการที่ (2.27) จะได้

$$E_T = \frac{Q_u \cdot c_u}{Q_f \cdot c_f} = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.34)$$

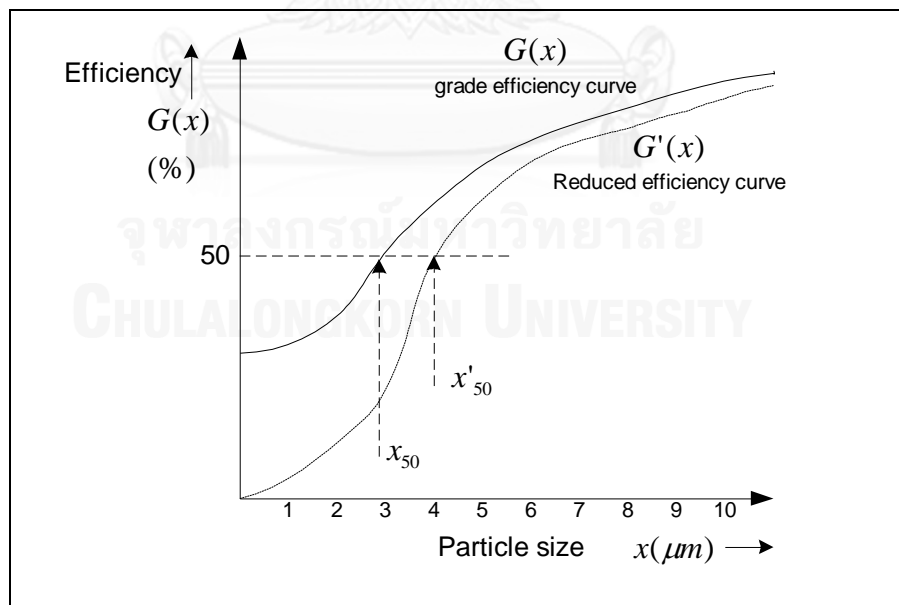
แทนค่า  $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$  ในสมการที่ (2.32) จะได้

$$E'_T = \frac{E_T - E_T}{1 - E_T} = 0 \quad (2.35)$$

ดังนั้นเพื่อแสดงค่าประสิทธิภาพที่สอดคล้องกับความเป็นจริง เราควรแสดงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนโดยใช้ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แทนการใช้ประสิทธิภาพรวม (total efficiency)

### 2.6.6.3 ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency)

การแสดงประสิทธิภาพทั้งสองแบบที่ได้กล่าวถึงก่อนนี้คือ ประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพลด เป็นการแสดงประสิทธิภาพของการแยกอนุภาคของแข็งโดยไม่คำนึงถึงขนาด แต่ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency) จะพิจารณาถึงขนาดอนุภาคของแข็ง กล่าวคือเป็นการนำค่าประสิทธิภาพของทุกขนาดอนุภาคของแข็งมาแสดงเป็นเส้นกราฟ เรียกว่า เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง

### 2.6.7 ขนาดตัด (Cut size)

ขนาดตัด คือ ขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ขนาดตัดสามารถหาได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น โดยดูค่าร้อยละของประสิทธิภาพที่แกน  $y$  จากนั้นอ่านค่าของขนาดอนุภาคที่แกน  $x$  ค่าที่อ่านได้ใช้เป็นตัวแทนของขนาดอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถทำการแยกได้ มีบางไฮโดรไซโคลอนใช้ขนาดตัดที่ร้อยละ 95 (เมื่อต้องการได้อนุภาคขนาดเล็ก) โดยทั่วไปยอมรับขนาดตัดที่ร้อยละ 50 (50% size) หรือเรียกว่า Equiprobable size หมายถึง ขนาดของอนุภาคที่มีโอกาสร้อยละ 50 จะถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลอน โดยอนุภาคขนาดหยาบและ/หรือขนาดใหญ่กว่า Equiprobable size  $x_{50}$  ที่จ่ายเข้าจะถูกแยกออกทางท่อทางออกด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กกว่าจะไม่ถูกแยก ซึ่งจะไหลออกทางท่อทางออกด้านบน

การหาขนาดตัดอีกวิธีหนึ่งทำได้โดยการวิเคราะห์ขนาดตัด (Analytical cut size,  $x_a$ ) คือ ขนาดอนุภาคที่ถูกแยกอย่างอุดมคติ ตามสัดส่วนของขนาดอนุภาคกับประสิทธิภาพรวม (Total efficiency,  $E_T$ ) ซึ่งเหมือนกับขนาดของช่องตะแกรงในอุดมคติที่จะสามารถแยก สัดส่วน  $E_T$  ของการจ่ายของแข็งเข้าไปให้ได้อนุภาคขนาดใหญ่ (Coarse product) เป็นต้น

$$F(x_a) = E_T \quad (2.36)$$

โดยที่  $F$  คือ ร้อยละของขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดตัด  $x_{50}$  (% oversize)

จะเห็นว่า  $x_a$  คือ ขนาดของอนุภาคหลายขนาดที่ปะปนกันอยู่ในไฮโดรไซโคลอน ซึ่งปริมาณของอนุภาคขนาดละเอียดในส่วนของอนุภาคหยาบ และอนุภาคขนาดหยาบในส่วนของอนุภาคขนาดละเอียด มีปริมาณเท่ากัน อีกทั้งภายใต้ขนาดตัดในสภาวะเชิงวิเคราะห์ (Analytical cut size) แบบเชิงเลข จะเท่ากับ Equiprobable size  $x_{50}$  ในทางปฏิบัติการกรณีที่ขนาดตัดสองค่าเท่ากันนั้น เกิดขึ้นได้ยาก (ยกเว้นประสิทธิภาพรวมมีค่าประมาณร้อยละ 50)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การออกแบบกระบวนการดูดซับ

Ip และคณะ (2009) ได้ศึกษาการดูดซับและการคายซับของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำบนตัวดูดซับต่างๆ โดยดูว่าผลของเกลือ เคมีพื้นผิว ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว ส่งผลอย่างไร โดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านสองชนิดที่ทำจากไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นต่างสองสถานะด้วยกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) และตัวดูดซับที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (carbon-F400) ถ่านกระดูก (bone char) และถ่านดินเลน (peat) โดยที่ตัวดูดซับทุกชนิดมีขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน จากงานวิจัยนี้พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นไปตาม เรดลิช-เพทเทอร์สัน (Redlich-Peterson) ในกระบวนการดูดซับ ผลของการเติมเกลือในรูปของโซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{PO}_4$ ) จะขึ้นกับอันตรกิริยาของเกลือกับตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ การใช้เกลือเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านไม้ไผ่ทั้งสองชนิดเพิ่มสูงกว่า 900 mg/g และเกลือไม่ส่งผลต่อค่าพีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดของระบบ

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Degs และคณะ (2008) และผลการวิจัยยังพบว่าพีเอชไม่ส่งผลต่อการคายซับของสีย้อมจากการทดลองในช่วงพีเอชที่ 6 ถึง 9 โดยการคายซับจะเกิดขึ้นมากขึ้นกับ ความแข็งแรงของพันธะ เช่น พันธะไอออนิกหรือพันธะโควาเลนต์ และ แรงจับกันอย่างอ่อน (weak binding force) เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงระหว่างขั้วของโมเลกุลสีย้อมกับพื้นผิวตัวดูดซับ ในทางกลับกันอันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตจะช่วยให้การดูดติดผิวดีขึ้นเกิดการคายซับน้อยลง ผลการวิจัยพบว่า ความสามารถการดูดซับของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีด้าบน F400, bone char, peat, bamboo BACX2 และ BACX6 จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายในแทรกตัวของไอออนสีย้อมขนาดใหญ่ เข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก โดยรูพรุนของ F400 ส่วนมากเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (ขนาดรูพรุน < 2 nm) ส่วนถ่านไม้ไผ่ทั้งสองชนิดมีพื้นที่ผิวและปริมาณของรูพรุนสูงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น BACX2 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กสูงที่สุด ส่วน BACX6 มีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง (รูพรุน ขนาด 2-50 nm) สูงที่สุด ผลของการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของตัวดูดซับโดยศึกษาความเป็นกรด เป็นด่าง พบว่า ถ่านกัมมันต์แสดงสมบัติทั้งความเป็นกรดและด่าง โดยสมบัติความเป็นเบสมีมากกว่า ในทางตรงกันข้ามถ่านไม้ไผ่มีสมบัติความเป็นกรดที่มากกว่า เมื่อศึกษาผลของอันตรกิริยาทางไฟฟ้า ระหว่างโมเลกุลของสีกับถ่านกัมมันต์เป็นแบบดูด ส่วนอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลสีกับถ่าน ไม้ไผ่เป็นแบบผลึก การเติมเกลือสามารถทำให้ประจุเป็นกลางได้โดยจะไปเปลี่ยนประจุลบของโมเลกุล สีย้อมและประจุลบบนพื้นผิวของถ่านไม้ ซึ่งส่งผลให้สามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น ในทางกลับกัน เกลือสามารถไปทำให้ประจุบวกบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ให้เป็นกลางได้และยังทำให้แรงดูระหว่าง โมเลกุลสีและถ่านกัมมันต์อ่อนลงด้วย

Al-Degs และคณะ (2008) ได้ศึกษาจลนศาสตร์ ไอโซเทอม และปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พีเอชของสารละลาย ความแรงไอออน และอุณหภูมิ โดยศึกษาปัจจัยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจาก Calgon Company ในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง มีความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นเท่ากับ  $1.0 \times 10^{-5}$  -  $1.2 \times 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 298 - 328 K ปรับพีเอช 2-10 ด้วยสารละลาย 0.5 M HNO<sub>3</sub> หรือ 0.5 M NaOH และปรับความแรงไอออนด้วย NaCl ความเข้มข้น 0.05-0.5 mol/dm<sup>3</sup> ผลการวิจัยพบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์เป็นแบบแลงเมียร์ พฤติกรรมการดูดซับสีย้อมทั้งสามเป็นในลักษณะเดียวกัน ความสามารถการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 6-8 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความแรงไอออนของสารละลาย โดยที่ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดนี้ความสามารถการดูดซับสูงสุดเมื่อพีเอชเท่ากับ 7 และมีอุณหภูมิ 298 K ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดสามารถดูดซับสีย้อมโทนสีน้ำเงินได้สูงสุด คือ 0.27 mmol/g ส่วนโทนสีแดงและสีเหลืองดูดซับได้ 0.24 และ 0.11 mmol/g ตามลำดับ รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ L2 ตามการแบ่งของ Giles และ Smith การดูดซับมีความสัมพันธ์และใกล้เคียงกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช การวิเคราะห์หาค่า pH<sub>pzc</sub> ของถ่านกัมมันต์ชนิดนี้พบว่ามีความเท่ากับ 9.0 และการดูดซับสีย้อมในสารละลายที่เป็นกรดเกิดขึ้นได้ดีกว่าในสารละลายที่เป็นด่าง

Yang และ Al-Duri (2005) ได้ศึกษาการจำลองแบบทางจลนศาสตร์ของการดูดซับเฟสของ ไทลของสีย้อมรีแอกทีฟบนถ่านกัมมันต์ในระบบแบบแบทช์ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและ ขนาดของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ Cibacron Red F-B (RR) Cibacron Navy F-G (RN) และ Cibacron Yellow F-3R (RY) ซึ่งเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสิ่ง ทอ และใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 (F400) คัดแยกขนาดด้วยตะแกรงมีขนาด อนุภาคดังนี้ 0.0412 0.0536 0.0816 และ 0.105 cm โดยทำการวิเคราะห์สมดุลของการดูดซับเทียบกับแบบจำลองไอโซเทอมต่างๆ และวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนศาสตร์โดยใช้สมการอันดับหนึ่งเสมือน สมการอันดับสองเสมือน และแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง อัตราการดูดซับขึ้นมาใหม่โดยปรับปรุงจากสมการอันดับหนึ่งเสมือน ผลการทดลองที่ได้พบว่า แบบจำลองทางจลนศาสตร์อันดับหนึ่งที่ปรับปรุงมีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลการทดลองในระบบ การดูดซับองค์ประกอบเดี่ยวมากที่สุด รายละเอียดของสมการการดูดซับที่ปรับปรุงมีดังนี้

เริ่มจากสมการอันดับหนึ่งเสมือน ;

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_0 - q_t) \quad (2.37)$$

ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนค่าคงที่อัตรา ;

$$k_1 = K_1 \frac{q_e}{q_t} \quad (2.38)$$

ได้สมการอัตราอันดับหนึ่งเสมือนที่ปรับปรุงใหม่

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1 \frac{q_e}{q_t} (q_0 - q_t) \quad (2.39)$$

จัดรูปและอินทิเกรต  $t \in (0, t)$  และความเข้มข้นบนตัวดูดซับตั้งแต่ 0 จนถึง  $q_t$  ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{q_t}{q_e} + \ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 t \quad (2.40)$$

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์  $\frac{q_t}{q_e} + \ln(q_e - q_t)$  กับ  $t$  ผู้วิจัย พบว่ามีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง

Al-Degs และคณะ (1999) ได้ศึกษาผลของเคมีบนผิวของคาร์บอนในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำเสียฟอกย้อม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ทำจากปิทมินัส เพื่อศึกษาความสามารถของ ถ่านกัมมันต์นี้ในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้งสามที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีเหลือง (Remazol Reactive Yellow) สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Reactive Black) และสีย้อมรี แอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Reactive Red) ผลการวิจัยพบว่า โดยปกติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็น แบบไม่มีขั้วแต่มีขั้วเล็กน้อยอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชัน เป็นผลให้ตัวดูดซับคาร์บอนมี



แนวโน้มที่จะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และมีสมบัติชอบสารอินทรีย์ (organophilic) ถ่านกัมมันต์นี้มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีเหลืองได้สูงสุดถึง 1111 mg/g รองลงมาคือโทนสีดำ และต่ำสุดคือโทนสีแดง และเมื่อขนาดของถ่านกัมมันต์เล็กลงความสามารถในการดูดซับจะสูงมากขึ้น โดยที่ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์นี้เป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอม และเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้นี้เป็นประเภท H-Carbon โดยที่ความสามารถในการดูดซับสูงจะแสดงประจุที่พื้นผิวสุทธิเป็นบวกซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการดูดซับ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยได้แนะนำไว้ว่า ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ (สีย้อมประจุลบ) ถ่านกัมมันต์ควรมีค่า  $pH_{ZPC}$  สูง ( $> 7.0$ ) และควรเป็นประเภท H-carbon

### 2.7.2 การออกแบบกระบวนการต่อเนื่องแบบตัวกลางเคลื่อนที่

Islam และคณะ (2009) ได้ศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำระบบถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (CSTR) และระบบถังปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor) มาใช้แทนถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุตัวกลาง (Fixed bed adsorption) ที่ใช้กันทั่วไป รวมถึงออกแบบสมการเพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะต่างๆ ผลการวิจัยพบว่า การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุตัวกลางต้องใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบแบทช์และการทดลองแบบคอลัมน์ ในขณะที่การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและถังปฏิกรณ์แบบท่อไหลใช้เพียงข้อมูลจากการทดลองแบบแบทช์ เมื่อพิจารณาในมุมของการทำนายประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและแบบท่อไหลสามารถทำนายประสิทธิภาพได้แม้สภาวะเดินระบบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งต่างจากถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุตัวกลางที่ไม่สามารถทำนายประสิทธิภาพได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ได้ออกแบบไว้

### 2.7.3 การออกแบบไฮโดรไซโคลอน

Saengchan และคณะ (2009) ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการแยกแ่งมันสำปะหลังออกจากน้ำด้วยไฮโดรไซโคลอน ได้แก่ ขนาดช่องทางออกส่วนล่าง (Apex diameter) ความดันลด (Pressure drop) และความเข้มข้นของของผสมที่จ่ายเข้า (Feed concentration) ทำการทดลองโดยปรับค่าดังนี้ ความดันลด (2, 4, 6 kg/cm<sup>2</sup>) ขนาดช่องทางออกส่วนล่าง (1.5, 2.1, 4.0 mm) และความเข้มข้นของแ่งมันสำปะหลัง (3, 7, 11 % weight by volume) แล้วหาสมการทำนายประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนจากการทดลองโดยขึ้นกับค่าขนาดช่องทางออกส่วนล่าง ความดันลด และความเข้มข้นของแ่งมันสำปะหลัง โดยพิจารณาประสิทธิภาพจาก สัดส่วนเชิงมวลของแ่งที่ทางออกส่วนล่างและทางเข้า (%R) สัดส่วนของปริมาตรแ่งที่ทางออกส่วนล่างกับทางเข้า (%R<sub>v</sub>) และประสิทธิภาพลด (E') พร้อมกับศึกษาขนาดตัด (d<sub>50</sub>) ของแต่ละสภาวะเดินระบบ ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มความดันลดส่งผลให้อัตราไหลเข้าและแรงหมุนเหวี่ยงสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น ได้ขนาดตัดเล็กลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพลดมากที่สุด ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของแ่งก่อนจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง เนื่องจากแ่งมีแนวโน้มออกทางออกส่วนบนมากกว่าออกทางออกส่วนล่าง ความเข้มข้นของแ่งมันสำปะหลังส่งผลต่อประสิทธิภาพน้อยที่สุด ในขณะที่รูปร่างของน้ำที่ออกทางออกส่วนล่างจะขึ้นกับขนาดของช่องทางออกส่วนล่าง ขนาด

ช่องทางออกส่วนล่างที่เล็กสุดทำให้ประสิทธิภาพการแยกไม่สูงมาก เนื่องจากแบ็งจะสะสมอยู่บริเวณ ส่วนกรวยและเคลื่อนที่ออกทางออกส่วนบน คณะผู้วิจัยยังได้แนะนำให้พิจารณาที่ความกว้างของช่องทางออกส่วนล่างเป็นอันดับแรกซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกมากที่สุด

#### 2.7.4 การออกแบบกระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Rastogi และคณะ (2008) ได้ศึกษาการใช้ถ่านลอยในการกำจัดเมทิลีนบลู (Methylene Blue) ออกจากน้ำเสีย และใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านลอยออกจากน้ำ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับและประสิทธิภาพในการแยกถ่านลอยด้วยไฮโดรไซโคลนขนาด 10 cm ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่พีเอชมีค่าเท่ากับ 6.75 ทำการทดลองโดยปรับอัตราการไหลของของผสมที่เข้าไฮโดรไซโคลนเท่ากับ 30 35 40 L/min และใช้ขนาดของถ่านลอยเท่ากับ 74 88 105 125 149 และ 177 ไมครอน และเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกถ่านลอยด้วยไฮโดรไซโคลน พบว่าเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นประสิทธิภาพการแยกดีขึ้นและได้ขนาดตัดเล็กลง และอนุภาคขนาดใหญ่สามารถแยกได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ถัดมาเป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโดยทดลองที่อัตราการไหล 40 L/min ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูเท่ากับ 65 75 และ 85 mg/L ใช้ถ่านลอยปริมาณ 400 500 600 700 800 และ 900 mg/L ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของถ่านลอยในการดูดซับเมทิลีนบลู คือ ปริมาณตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ นั่นคือในกรณีที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูคงที่ค่าหนึ่ง หากใช้ปริมาณของตัวดูดซับมากขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น

#### 2.7.5 สรุปข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

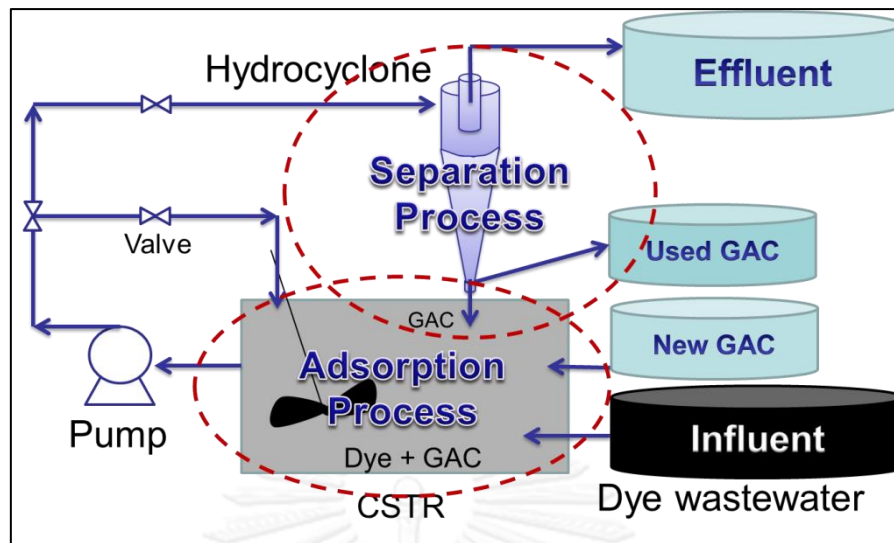
จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าส่วนใหญ่พบว่าจะเป็นการมุ่งเน้นเพื่อศึกษาผลของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งเป็นสำคัญ เช่น มุ่งเน้นเพื่อศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ เช่นในงานวิจัยของ Ip และคณะ (2009); Al-Degs และคณะ (2008); Yang และ Al-Duri (2005); Al-Degs และคณะ (1999) แต่เมื่อทำการเติมตัวดูดซับลงไปเพื่อกำจัดตัวถูกดูดซับ เมื่อตัวถูกดูดซับไปติดอยู่บนพื้นผิวหรือรูพรุนของตัวดูดซับแล้ว สิ่งที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำก็คือตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการแยกตัวดูดซับมีด้วยกันหลายวิธี เช่น หากตัวดูดซับมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงก็สามารถปล่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือหากตัวดูดซับมีขนาดเล็กก็สามารถใช้วิธีการกรองได้ แต่ถ้าในบางกรณีที่เราต้องการบำบัดมลสารแบบเร่งด่วนหรือในกรณีฉุกเฉินที่ระบบบำบัดหลักไม่สามารถกำจัดได้ผ่านมาตรฐาน พื้นที่เดินระบบมีอย่างจำกัดและต้องการความรวดเร็วในการแยกกระบวนการเหล่านี้ก็อาจจะไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ ดังเช่นในการแยกตัวดูดซับขนาดเล็ก (50-200 ไมครอน) หากแยกด้วยการตกตะกอนจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนานและหากอัตราการน้ำที่เข้ามีปริมาณมาก ก็จำเป็นต้องออกแบบให้มีพื้นที่เพื่อการตกตะกอนมากขึ้นด้วย ดังนั้นการแยกตัวดูดซับขนาดเล็กอาจจะกระบวนการแยกโดยอาศัยแรงหมุนเหวี่ยงได้ ดังเช่นในงานวิจัยของ Rastogi และคณะ (2008) ได้ใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านลอยที่มีขนาด 74-177 ไมครอน ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูแล้ว ซึ่งในระบบไฮบริดนี้ช่วยให้ประหยัดพื้นที่โดยไม่ต้องมีถังตกตะกอนหรือถังกรองแต่อย่างใด ซึ่งเป็นข้อดีอย่างมากของระบบไฮบริดนี้ และยังมีผู้วิจัยระบบลักษณะนี้ไม่มากนัก

อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบยังมีไม่เพียงพอ ดังนั้นเพื่อการออกแบบระบบไฮบริดกระบวนการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์และกระบวนการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลอน ก็มีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทั้งสองกระบวนการก่อน และทำการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่ทั้งสองกระบวนการนี้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการดูดซับ เช่นในงานวิจัยของ Ip และคณะ (2009); Al-Degs และคณะ (2008); Yang และ Al-Duri (2005); Al-Degs และคณะ (1999) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีเอกทีฟโทนสีต่างๆ ด้วยตัวดูดซับต่างชนิดกัน ส่วนใหญ่จะเลือกใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเป็นหลัก เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนจำนวนมากส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูง

ในการศึกษาปัจจัยของกระบวนการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอน จากการศึกษางานวิจัยของ Saengchan และคณะ (2009) ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแยกแ่งมันสำปะหลังที่มีขนาดเฉลี่ย 8.5 ไมครอน พบว่า ปัจจัยที่ควรพิจารณาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงคือ ต้องเลือกไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดเหมาะสมกับอนุภาคที่ต้องการแยก ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของไฮโดรไซโคลอนด้วยสมการที่ใช้ออกแบบโดยใช้ขนาดตัดของอนุภาคที่ต้องการแยก และผลจากขนาดของช่องทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลอน ในส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของไฮโดรไซโคลอนด้วยตามสัดส่วนการออกแบบโดย Bradley (1965) ปัจจัยถัดมาคือ ความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนยิ่งความดันจ่ายเข้ามาประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งความดันจ่ายเข้าก็สัมพันธ์กับอัตราการไหลเข้า ทั้งนี้หากความดันจ่ายเข้ามาจนเกินไปและช่องทางออกส่วนล่างมีขนาดเล็ก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากจะเกิดการสะสมบริเวณส่วนกรวยและมีโอกาสไหลเข้าสู่เส้นการไหลออกทางออกส่วนบนมากขึ้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย อัตราไหลเข้าไฮโดรไซโคลอนที่ได้นี้ยังส่งผลกับกระบวนการดูดซับด้วย เนื่องจากกระบวนการดูดซับถูกควบคุมด้วยปริมาณของตัวดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส และปริมาตรถัง

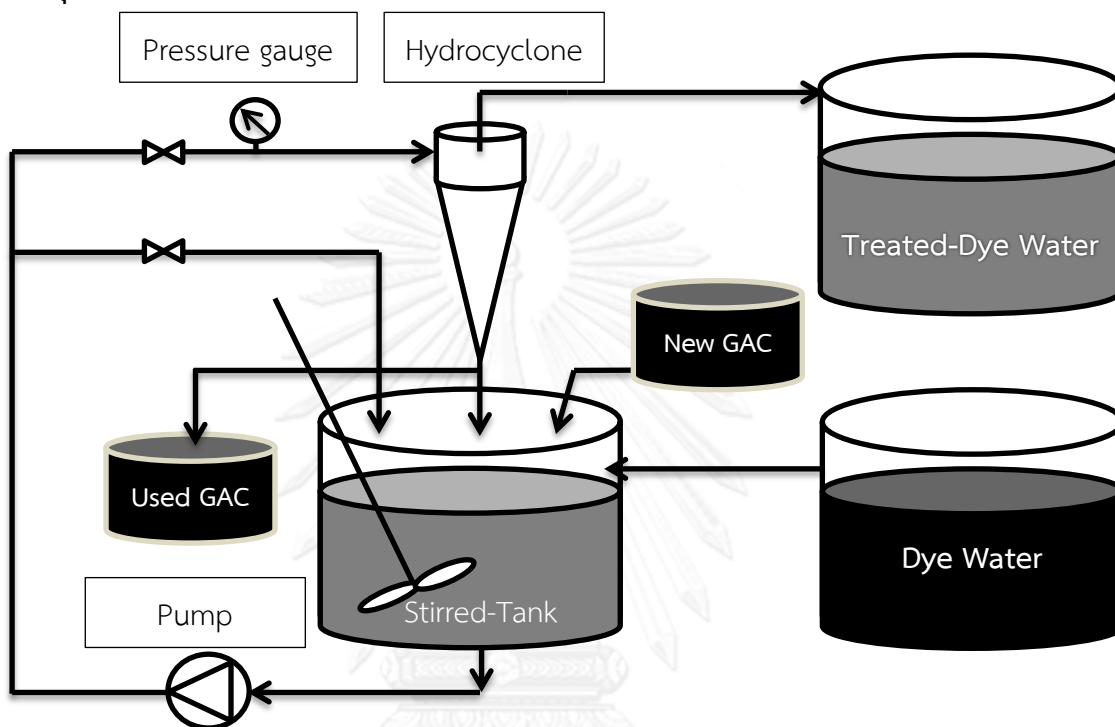
ระบบไฮบริดในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และกระบวนการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลอน โดยให้น้ำเสียดสี้อมไหลเข้าสู่ถังกวนผสม (CSTR) น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกส่งไปยังไฮโดรไซโคลอนด้วยเครื่องสูบน้ำ ไฮโดรไซโคลอนมีหน้าที่แยกน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกทางออกส่วนบนของไฮโดรไซโคลอน และถ่านกัมมันต์จะถูกแยกออกที่ทางออกส่วนล่าง ในระหว่างเดินระบบถ่านกัมมันต์จะมีการเติมเข้าและนำถ่านกัมมันต์ออกตลอดเวลา แผนภาพระบบไฮบริดแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

### บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์

##### 3.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

- ไฮโดรไซโคลนยี่ห้อ NYRTEC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 75 มิลลิเมตร
- เครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์
- ใบพัดกวนผสมน้ำชนิด Rushton turbine ขนาด 1.1 กิโลวัตต์
- เครื่องวัดความดัน (Pressure gauge)
- วาล์วสามทาง
- ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 350 ลิตร
- ถังที่ใช้สำหรับกวนผสมพร้อมเครื่องกวนผสม
- ถังเตรียมและเก็บน้ำเสียสี่เหลี่ยมสังเคราะห์ 150 ลิตร จำนวน 2 ถัง
- ขวดพลาสติกสำหรับเก็บน้ำตัวอย่าง
- นาฬิกาจับเวลา

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- ตะแกรงคัดขนาด (Molecular sieve) ขนาด 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30 และ 35 เมช (Mesh)
- เครื่องเขย่าแบบวง (Orbital shaker)
- เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 4 ยี่ห้อย OHAUS
- ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ 103-105 องศาเซลเซียส ยี่ห้อย WTB Binder
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

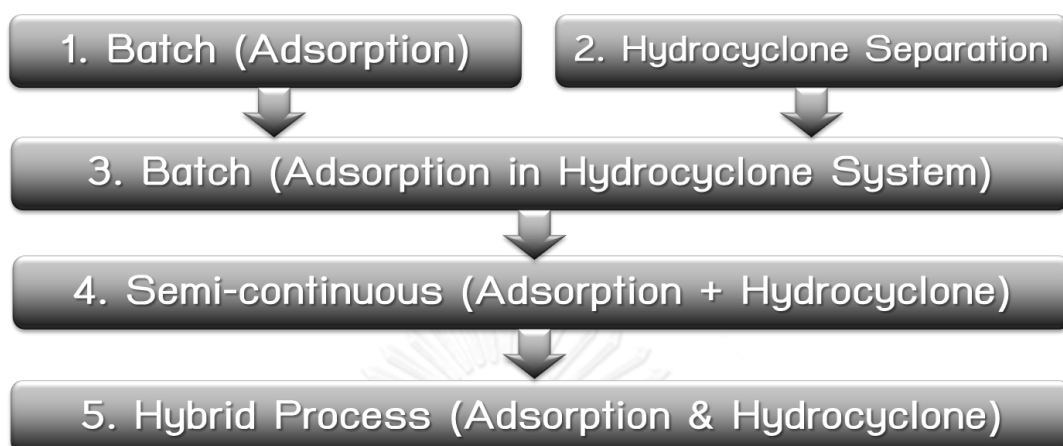
### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง

- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV/Visible spectrophotometer รุ่น Genesys 10 UV Scanning, Single cell holder ยี่ห้อย Thermo Fisher Scientific, USA
- หลอดเนสเลอร์ (Nessler Tubes) ทรงสูง ความจุ 50 มิลลิลิตร
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว (BET) รุ่น Autosorb 1C ยี่ห้อย Quantachrome Instrument, U.S.A.
- ชุดอุปกรณ์การกรองเพื่อวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย
  - กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน
  - บั้มดูดสุญญากาศ
  - ชุดกรวยกรองบุคเนอร์

### 3.1.4 สารเคมี

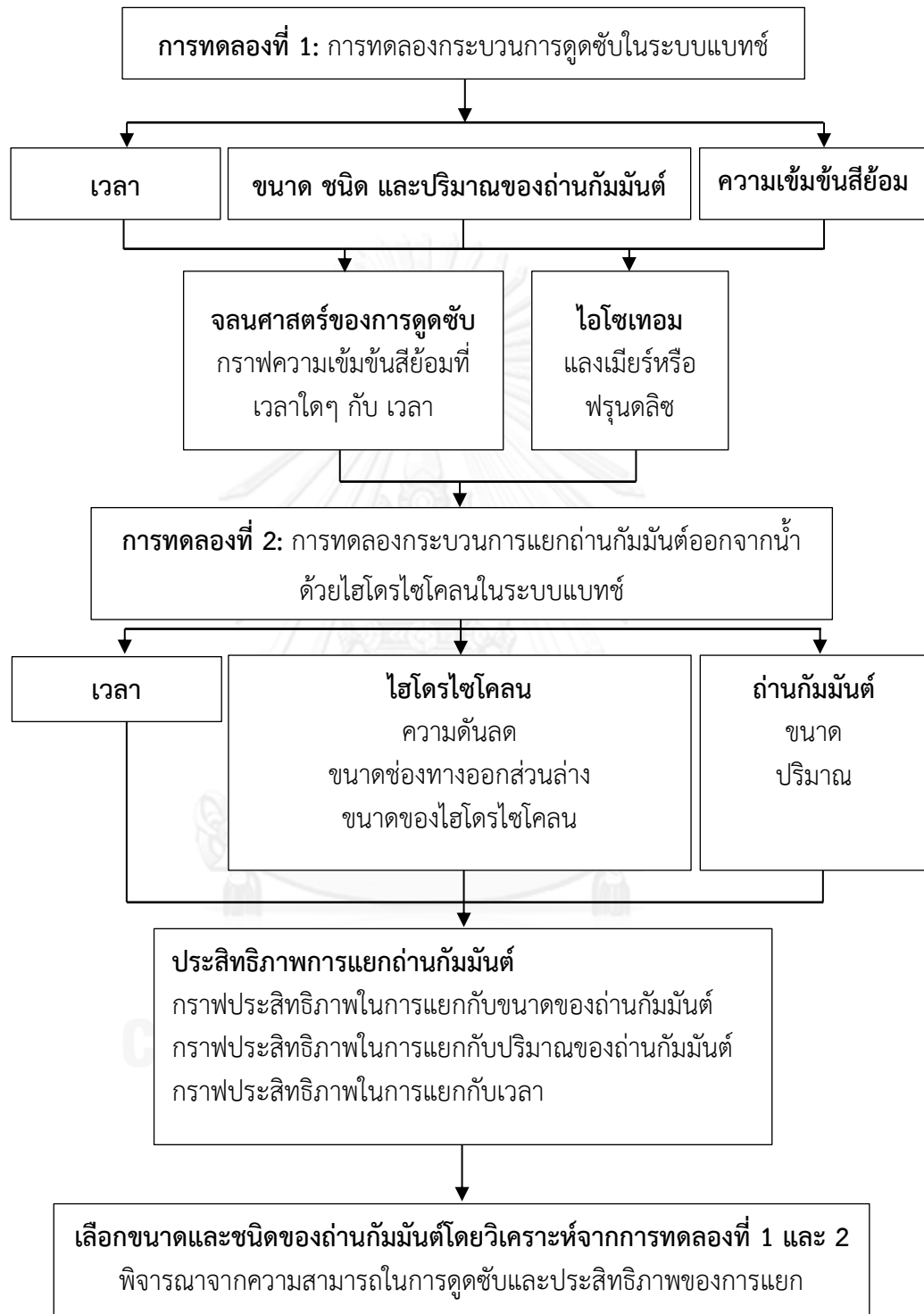
- สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5, RB 5) จากบริษัท Dystar Thai Ltd.
- ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 ของบริษัท Calgon carbon corporation
- ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Hydrosorb bituminous shell based carbon ของบริษัท Aqua kinetic Ltd.
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 ของบริษัท EnviroChemicals Ltd.

### 3.2 ภาพรวมของการวิจัย

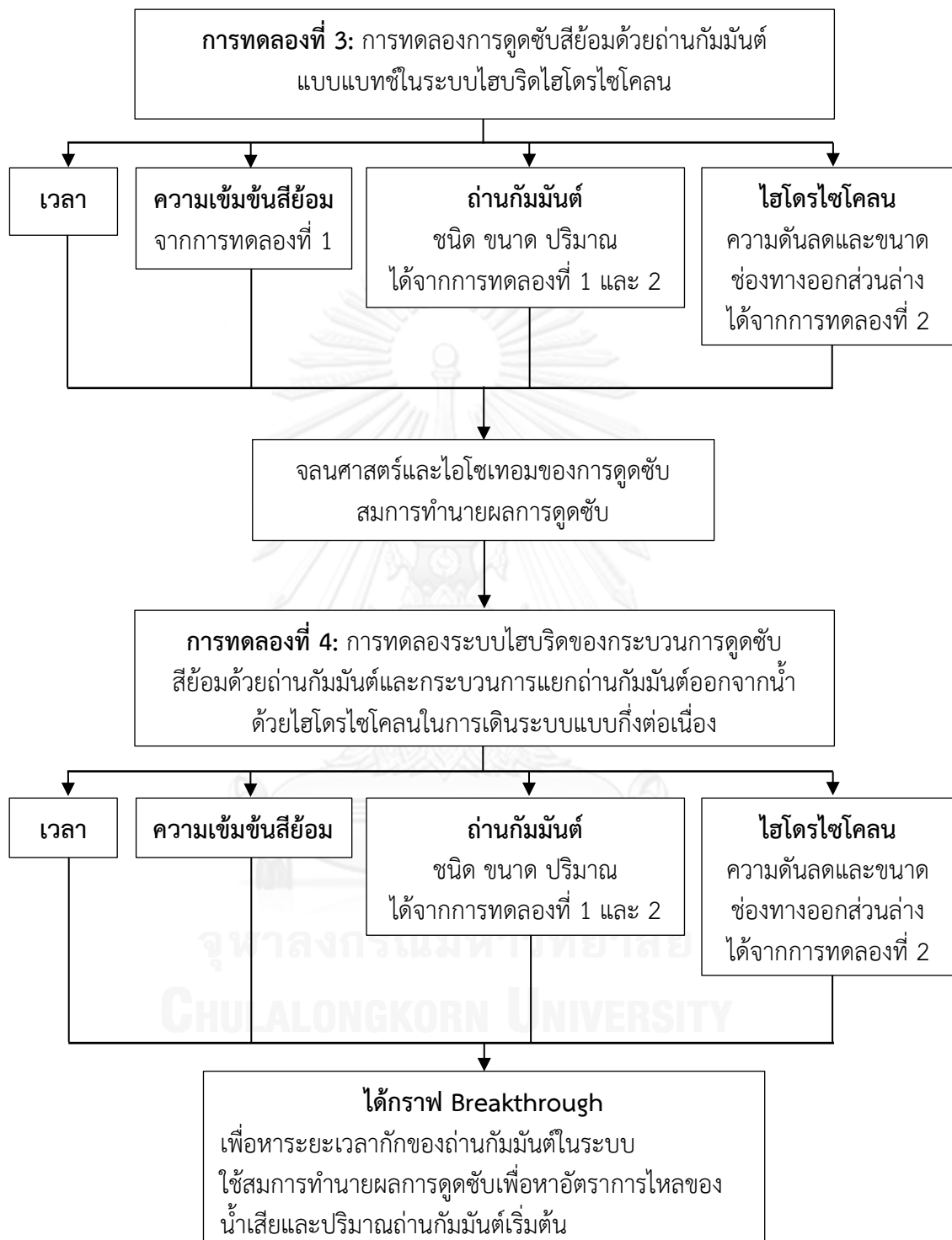


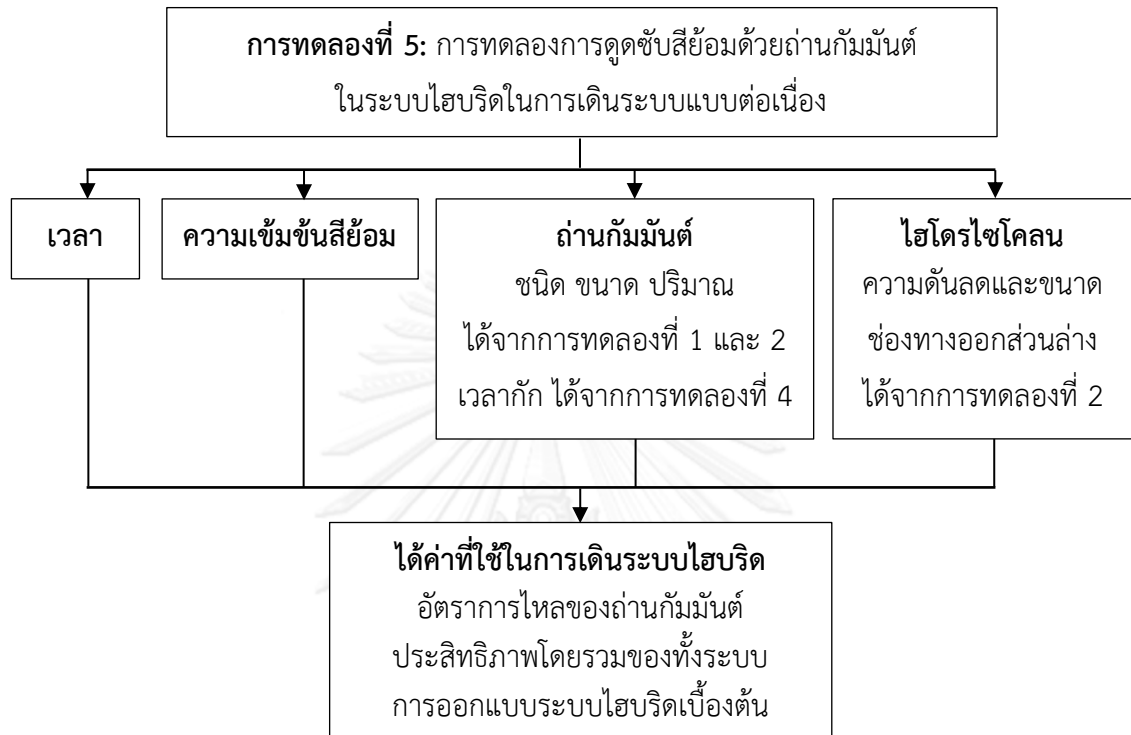
1. การทดลองแบบแบทช์ (ในห้องปฏิบัติการ) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผง
2. การทดลองในระบบไฮโดรไซโคลนเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
3. การทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮโดรไซโคลน (Batch adsorption in Hydrocyclone system) เพื่อเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮบริด (ไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด)
4. การทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) คือ ให้น้ำเสียสีย้อมไหลผ่านระบบไฮบริด โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับเริ่มต้นค่าหนึ่ง (ไม่มีการหมุนเวียนตัวดูดซับ) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด
5. การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) คือ ให้น้ำเสียสีย้อมไหลผ่านระบบไฮบริด รวมถึงมีการเติมเข้าและนำออกของตัวดูดซับ (มีการหมุนเวียนตัวดูดซับ) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม

## 3.3 แผนการทดลอง



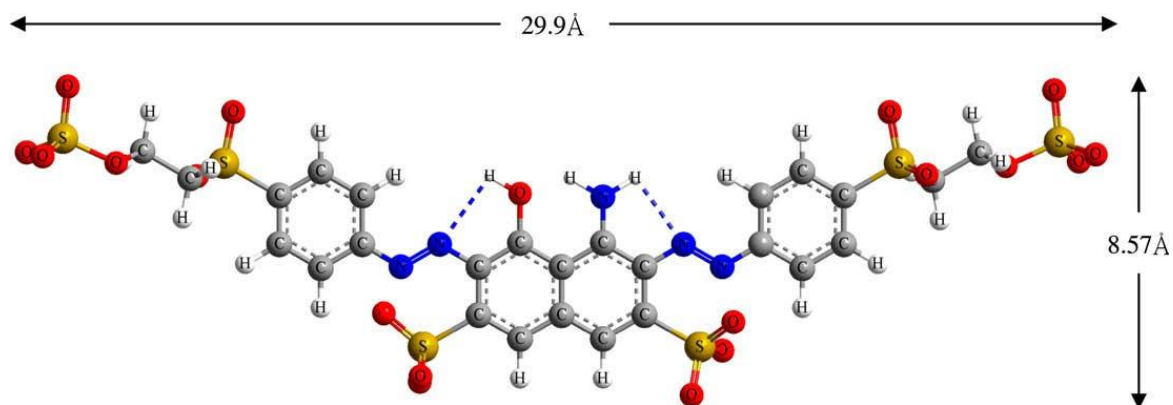






### 3.4 ตัวถูกดูดซับ (สีย้อม)

สีย้อมที่ใช้สำหรับการทดลองคือ สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5; RB5) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Dystar Thai Ltd. สมบัติของสีย้อมทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5) (Ip, 2009)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของตัวถูกดูดซับ (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร, 2551)

ตัวถูกดูดซับ	ประจุ	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	ขนาด (nm. x nm.)	ความยาวคลื่นที่ ใช้ตรวจวัด (นาโนเมตร)
Reactive Black 5	ลบ	991.82	3.61 x 1.23	597

### 3.5 ตัวดูดซับ (ถ่านกัมมันต์)

วัสดุที่ใช้สำหรับเป็นตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Hydrosorb bituminous shell based carbon ของบริษัท Aqua kinetic และ Filtrasorb 200 ของบริษัท Calgon carbon corporation และถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 ของบริษัท EnviroChemicals Ltd.

ตารางที่ 3.2 สมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในงานวิจัย

รายละเอียด	Filtrasorb 200	Hydrosorb bituminous coal base
1. Particle Size Distribution (US Mesh Size)	12x40	12x40
2. Iodine Number (mg/g)	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/Abrasion Number	MIN. 75	MIN. 98
8. Moisture Content (ASTM D 2867) (% w/w)	MAX. 2 850	MIX. 8 1015
9. Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	1.9 (MAX)	

**หมายเหตุ** ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 และ Hydrosorb bituminous coal base สั่งซื้อจากบริษัท Calgon carbon corporation และบริษัท Aqua kinetic Ltd. ตามลำดับ

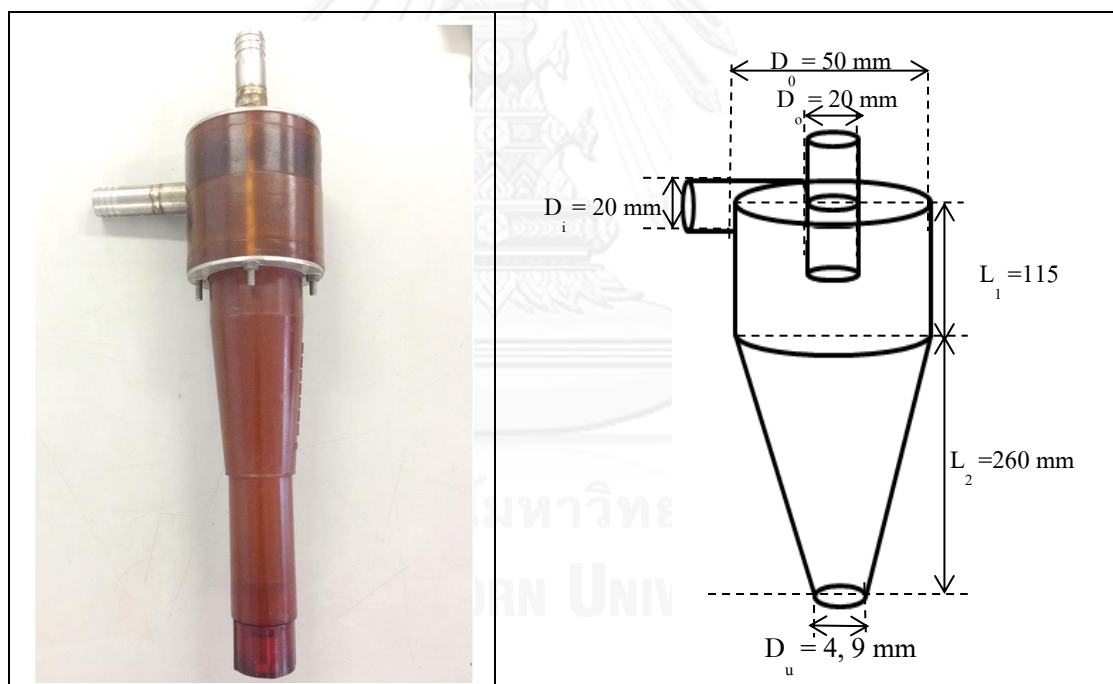
ตารางที่ 3.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 (Punyapalukul, 2004)

สมบัติ	
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย	1.9 นาโนเมตร
พื้นที่ผิวเบท (BET)	980 ตารางเมตรต่อกรัม
พื้นที่ผิวภายนอก	59 ตารางเมตรต่อกรัม
ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง	276 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อกรัม
ค่า pH <sub>pzc</sub>	9.8
ขนาดอนุภาค	36.54 ไมโครเมตร
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	คาร์บอกซิลฟีนิล และอื่น ๆ
สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ	ไม่ชอบน้ำ

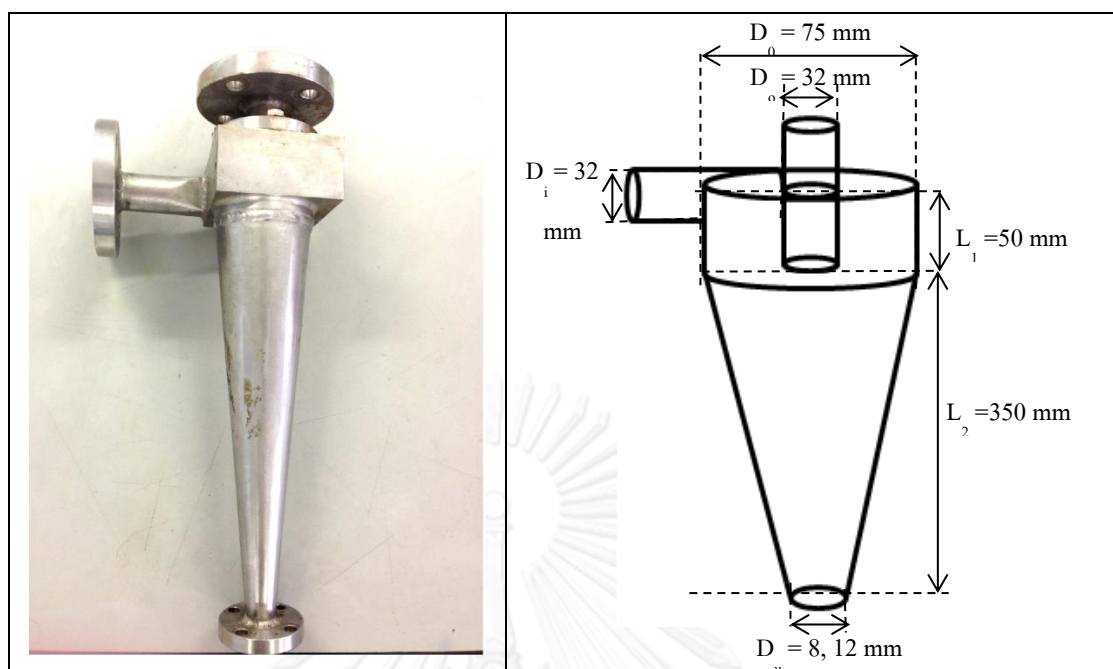
### 3.6 ไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดเฉพาะไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย (ลักซิกา กองวิเชียร, 2556)

รายละเอียด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน	
	50 มม.	75 มม.
1. วัสดุที่ใช้ทำตัวเรือนไฮโดรไซโคลน	โพลียูเรเทน	เหล็กกล้าไร้สนิม
2. เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน ( $D_c$ )	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. ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน ( $H$ )	375	400
7. ความยาวของส่วนทรงกระบอก ( $L_1$ )	115	50
8. ความยาวของส่วนทรงกรวย ( $L_2$ )	260	350



ก.



ข.

รูปที่ 3.3 รายละเอียดเฉพาะไฮโดรโซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย  
ไฮโดรโซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก.) 50 และ (ข.) 75 มิลลิเมตร  
(ลักขิกา กองวิเชียร, 2556)

### 3.7 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.7.1 น้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ

สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ ผสมสีย้อมที่ความเข้มข้น 40 80 120 170 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/Visible spectrophotometer สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสีย้อม (มก./ล.) แกน Y และค่าการดูดกลืนแสง (Abs) แกน X

3.7.2 การทดลองที่ 1 การทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (ชนิดและปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ รวมถึงจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับ)

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอมของสี้อมบนพื้นผิวตัวดูดซับ

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง 25±2 องศาเซลเซียส
ปริมาณสารละลายสี้อม	50 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นของสารละลายสี้อม	150 มิลลิกรัมต่อลิตร
จำนวนรอบในการเขย่า	200 รอบต่อนาที
ชนิดของสี้อม	สี้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม	75 150 300 400 500 700 800 900 มิลลิกรัมต่อลิตร
ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	Filtrisorb 200 และ Hydrosorb
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง	Shirasagi S-10 (35.64 ไมครอน)
เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	12x14 16x18 20x24 30x35 และ 12x40 เมช
ปริมาณตัวดูดซับ (ถ่านกัมมันต์)	2 4 และ 10 กรัม
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของสี้อมคงเหลือ	วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร

- นำถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrisorb 200 ขนาด 12x14 เมช ปริมาณ 0.1 กรัม (2 กรัมต่อลิตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 34 ขวด
- นำสารละลายสี้อมความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
- นำไปเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที
- เก็บตัวอย่างสารละลาย 34 ขวด ตามเวลาที่กำหนดดังนี้ ที่เวลาผ่านไป 0 5 15 30 45 60 75 90 105 120 150 180 210 240 นาที และที่ 5 6 7 ... 22 23 24 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสี้อมคงเหลือ
- กรองตัวอย่างสารละลายเพื่อแยกตัวดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C 0.45 ไมครอน
- นำตัวอย่างสารละลายวิเคราะห์หาความเข้มข้นสี้อมที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร
- ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับเป็น 4 และ 10 กรัม ตามลำดับ

8) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนชนิดของตัวกลางดูดซับจาก Filtrasorb 200 เป็น Hydrosorb bituminous coal base

9) ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 จาก 12x14 เมช เป็น 16x18 20x24 30x35 และ 12x40 ตามลำดับ

10) ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 300 400 500 700 800 900 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

11) นำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) กับความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ ( $C_t$ ) เพื่อให้ได้เวลาที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล

12) นำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) และความสามารถในการดูดซับสีย้อม ( $q_e$ ) ของถ่านกัมมันต์ ตามขนาดและชนิด

13) นำข้อมูลมาสร้างกราฟเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับโดยใช้สมการดังต่อไปนี้ (Gulnaz และคณะ, 2006)

- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.1)$$

- ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.2)$$

- ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion)

$$q_t = k_p t^{1/2} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$q_e$  ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่จุดสมดุล หรือ ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_t$  ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$k_1$  ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (นาที่<sup>-1</sup>)

$k_2$  ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)

$k_p$  ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค ( มิลลิกรัมต่อกรัม นาที<sup>0.5</sup>)



$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (3.4)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (3.5)$$

- $C_0$  ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_e$  ความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_t$  ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $V$  ปริมาตรสารละลาย (ลิตร)  
 $m$  ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right)\left(\frac{1}{bq_m}\right) \quad (3.6)$$

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3.7)$$

- โดย  $q$  ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_m$  ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $C_e$  ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $K$  ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (ลิตรต่อกรัม)  
 $1/n$  ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดลิช  
 $b$  ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบถึงข้อมูลทางจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับ

3.7.3 การทดลองที่ 2 ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยก ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ (ชนิดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ ชนิดเกล็ด ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน รวมถึงตรวจสอบความเร็วเกรเดียนท์ของใบพัดว่าสามารถทำให้ระบบมีการกวนผสมหรือไม่)

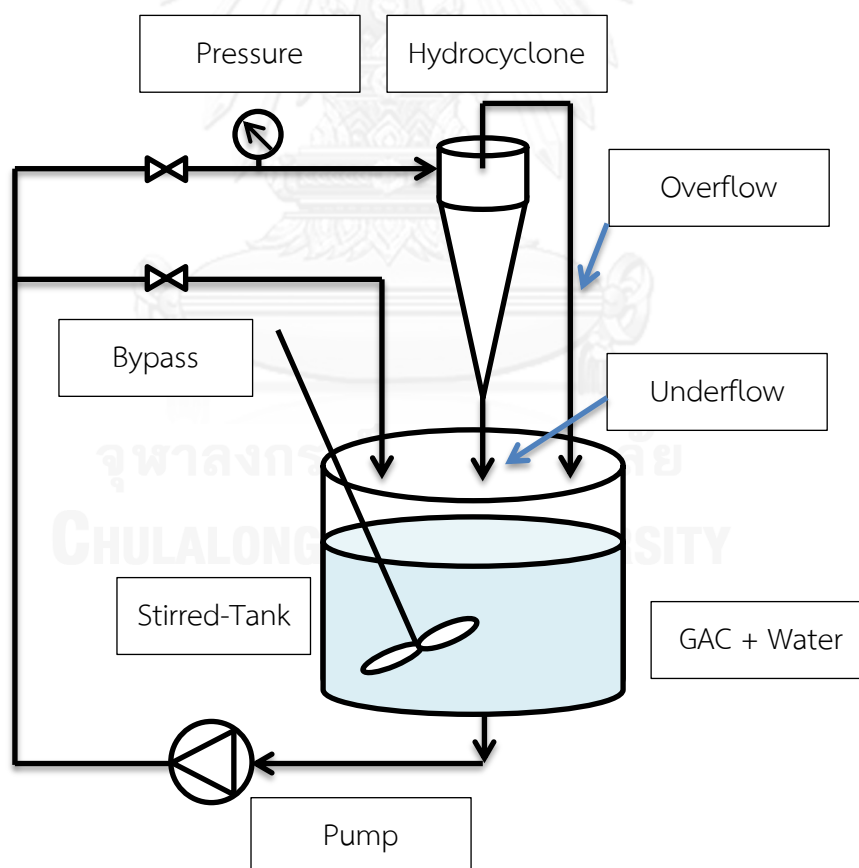
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดของไฮโดรไซโคลน ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 75 มิลลิเมตร จากการทดลองที่ 1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกส่วนล่าง - ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร - ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 มิลลิเมตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	4 และ 9 มิลลิเมตร 8 และ 12 มิลลิเมตร 1 กรัมต่อลิตร 12x14 16x18 20x24 30x35 และ 12x40 เมช 0.5 1 และ 2 บาร์
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
อัตราการไหล ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา กรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือค้างบน กระดาษกรองเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศา เซลเซียส

- 1) ทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร
- 2) เดินเครื่องสูบน้ำปรับความดันจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน 3 ค่า ดังนี้ 0.5 1 และ 2 บาร์ โดยปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลอ้อม (By Pass) จนค่าความดันจ่ายเข้าที่แสดงบนเครื่องมือวัดความดัน (Pressure gauge) ถึงค่าที่ต้องการ
- 3) เติมถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ในถังกวนผสม
- 4) เก็บน้ำตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง คือ ช่องทางจ่ายน้ำเข้า ท่อทางออกส่วนบน และท่อทางออกส่วนล่าง ที่เวลา 15 30 60 90 120 150 180 นาที และที่ 4 5 6 7 8 ชั่วโมง วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกส่วนล่างและทางออกส่วนบน คำนวณหาอัตราการไหลจากปริมาตรน้ำต่อหน่วยเวลา

- 5) นำน้ำตัวอย่างที่เก็บมาจากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย โดยการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C 0.45 ไมครอน
- 6) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลอนจาก 9 มิลลิเมตรเป็น 4 มิลลิเมตร
- 7) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจาก 12x14 เมช เป็น 16x18 20x24 30x35 และ 12x40 เมช
- 8) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนไฮโดรไซโคลอนเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกส่วนล่างเป็น 8 และ 14 มิลลิเมตร
- 9) นำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพลดกับความดันตก และขนาดของถ่านกัมมันต์ ที่เวลาใดๆ

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบตัวแปรที่สามารถทำให้ไฮโดรไซโคลอนมีประสิทธิภาพในการแยกสูงสุด ได้แก่ ขนาดของถ่านกัมมันต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ความดันตกและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน เพื่อนำไปใช้ในการทดลองถัดไป



รูปที่ 3.4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดออกจากน้ำ ในการทดลองที่ 2

3.7.4 การทดลองที่ 3 การทดลองการดูดซับแบบแบบทซ์ในระบบไฮโดรไซโคลน เพื่อวิเคราะห์หา  
สภาวะสมดุลของการดูดซับและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมกับระบบไฮบริดไฮโดร  
ไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดสีย้อม

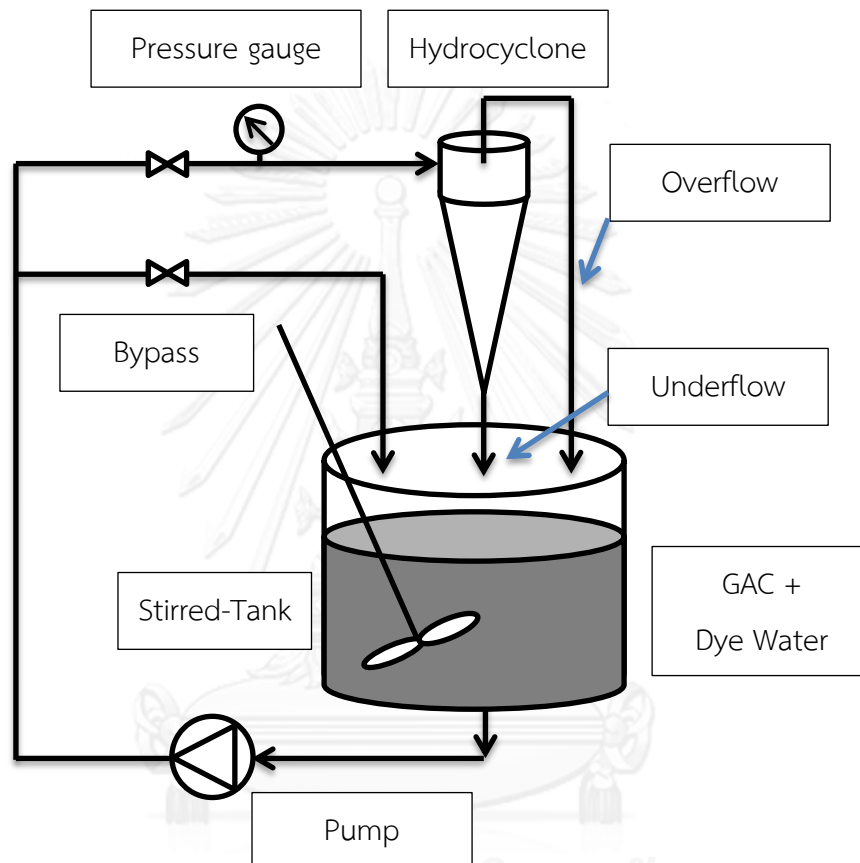
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาในการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน	จากการทดลองที่ 2
อุณหภูมิ	33±2 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น	150 มิลลิกรัมต่อลิตร
ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	จากการทดลองที่ 1
เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	จากการทดลองที่ 1 และ 2
ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	จากการทดลองที่ 2
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน	จากการทดลองที่ 2
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณตัวดูดซับ	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือ	วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร

- 1) นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร บรรจุในถังกวนผสม
- 2) ใช้ขนาดของไฮโดรไซโคลน ขนาดช่องทางออกด้านล่างที่ได้จากการทดลองที่ 2 และปรับความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนตามค่าที่เลือกจากการทดลองที่ 2 โดยปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลอ้อม (By pass)
- 3) ใส่ถ่านกัมมันต์ที่เลือกจากการทดลองที่ 1 และ 2 ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร ลงในถังกวนผสม
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างจากช่องทางออกส่วนบนตามเวลา ดังนี้ 0 5 15 30 45 60 75 90 105 120 150 180 210 240 นาที และที่ 5 6 7 8 ชั่วโมง
- 5) กรองตัวอย่างสารละลายเพื่อแยกตัวดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C 0.45 ไมครอน
- 6) นำตัวอย่างสารละลายวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร
- 7) ทำการทดลองซ้ำ 1-6 โดยเปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 1 และ 2 กรัมต่อลิตรตามลำดับ
- 8) นำข้อมูลไปเขียนกราฟระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมและเวลา

- 9) นำข้อมูลเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) และความสามารถในการดูดซับสีย้อม ( $q_e$ )

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด



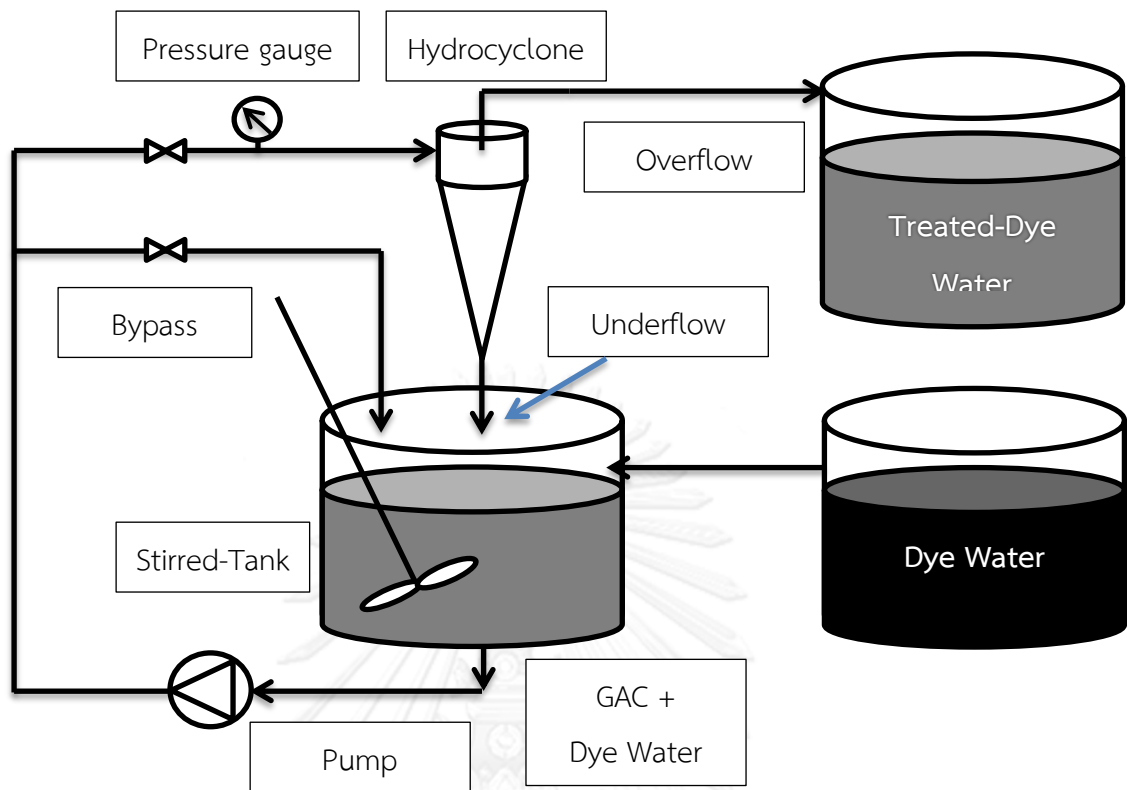
รูปที่ 3.5 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 3

3.7.5 การทดลองที่ 4 การทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการไหลของสีย้อมที่ต้องการบำบัด (Q) และปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (m) รวมทั้งศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในระบบ (SRT) และเวลาที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ ( $T_E$ )

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน อุณหภูมิ	จากการทดลองที่ 2 33±2 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองที่ 1
เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์	จากการทดลองที่ 1 และ 2
ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	จากการทดลองที่ 2
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกส่วนล่างของ ไฮโดรไซโคลน	จากการทดลองที่ 2
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณตัวดูดซับ	1 2 และ 4 กรัมต่อลิตร
อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์	0.5 และ 1 ลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือ	วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโน เมตร

- 1) เตรียมน้ำเสียสีย้อมความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถังกวนผสมปริมาณ 300 ลิตร
- 2) นำถ่านกัมมันต์ชนิดและขนาดที่เลือกจากการทดลองที่ 1 และ 2 เติมในปริมาณ 4 กรัมต่อลิตร ลงในถังกวนผสม
- 3) ให้น้ำเสียสีย้อมความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลเข้าสู่ถังกวนผสมตลอดเวลาด้วยอัตราการไหล ( $Q_{CSTR,in}$ ) 0.5 ลิตรต่อนาที
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างจากช่องทางออกส่วนบนตามเวลา ดังนี้ 0 30 60 นาที และที่ 2 3 ... 7 8 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร
- 5) ทำการทดลองซ้ำ 1-4 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 1 ลิตรต่อนาที และปริมาณตัวดูดซับเป็น 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- 6) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ (แกน Y) และเวลา (แกน X)



รูปที่ 3.6 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 4

#### Water Balance

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$Q_{CSTR,in} = Q_{HC,OF}$$

$$Q_{HC,in} = Q_{HC,OF} + Q_{HC,UF}$$

- $Q_{CSTR,in}$  คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ย้อมที่เข้าถังกวนผสม
- $Q_{HC,in}$  คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ย้อมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน
- $Q_{HC,OF}$  คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ย้อมที่ออกที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน
- $Q_{HC,UF}$  คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ย้อมที่ออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ย้อมที่ต้องการบำบัด ( $Q_L$ ) และปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (m) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบไฮบริด รวมทั้งศึกษาเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ในระบบ (SRT) และเวลาที่ตัวดูดซับจะหมดประสิทธิภาพ ( $T_E$ )

### 3.7.6 การทดลองที่ 5 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous Operating) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบไฮบริดไฮโดรไฮโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการกำจัดสีย้อม โดยใช้สภาวะที่เลือกจากการทดลองที่ผ่านมา

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไฮโคลน	จากการทดลองที่ 2
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ชนิดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	จากการทดลองที่ 1
เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	จากการทดลองที่ 1 และ 2
ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไฮโคลน	จากการทดลองที่ 2
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไฮโคลน	จากการทดลองที่ 2
อัตราการไหลของของน้ำเสียสีย้อม	0.5 ลิตรต่อวินาที
ปริมาณถ่านกัมมันต์เริ่มต้น	4 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อัตราการไหลของถ่านกัมมันต์	0.42 0.83 1.25 2.0 และ 2.5 กรัมต่อนาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของสีย้อมที่ทางออกส่วนบน	วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร

- 1) ให้น้ำเสียสีย้อมที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านเข้าสู่ถังกวนผสมตลอดเวลาด้วยอัตราการไหลเข้า ( $Q_L$ ) 0.5 ลิตรต่อนาที
- 2) นำถ่านกัมมันต์ชนิด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เลือกจากการทดลองที่ 1 และ 2 ปริมาณ 1200 กรัม (4 กรัมต่อลิตร) ใส่ลงในถังกวนผสม
- 3) เติมถ่านกัมมันต์เข้าถังกวนผสมทุก 30 นาที ด้วยอัตราการไหลของตัวดูดซับ ( $L_S$ ) 2.5 กรัมต่อนาที
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างจากการไหลส่วนบนทุก 1 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ ( $C_L$ ) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร
- 5) คำนวณความสามารถในการดูดซับของสารตัวกลาง ณ จุดที่ออกจากระบบ ( $q_1$ ) จาก

$$q_e = \frac{Q_L(C_0 - C_L)}{L_S} \quad (3.8)$$

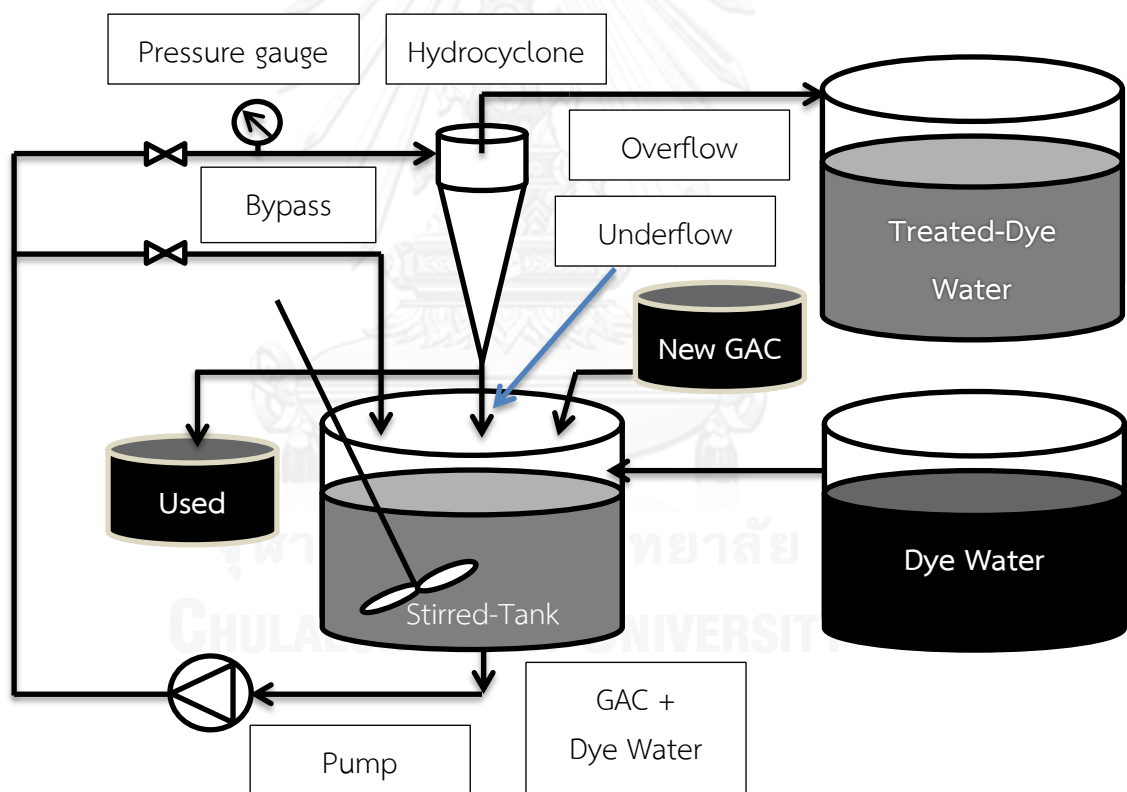


โดยที่

- $L_S$  คือ อัตราของถ่านกัมมันต์ที่เข้าและออกจากระบบ (กรัม/นาท)
- $Q_L$  คือ อัตราการไหลของน้ำเสียสีย้อม (ลิตร/นาท)
- $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
- $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัม/ลิตร)
- $C_L$  คือ ความเข้มข้น ณ จุดสมดุล ของสีย้อม (มิลลิกรัม/ลิตร)

- 6) ทำการทดลองซ้ำ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของตัวดูดซับ ( $L_S$ ) เป็น 2 1.25 0.83 และ 0.42 กรัมต่อนาที ตามลำดับ

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบความเป็นไปได้ในการใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ของระบบไฮบริด และข้อมูลการออกแบบระบบไฮบริดเบื้องต้น



รูปที่ 3.7 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองที่ 5

## บทที่ 4

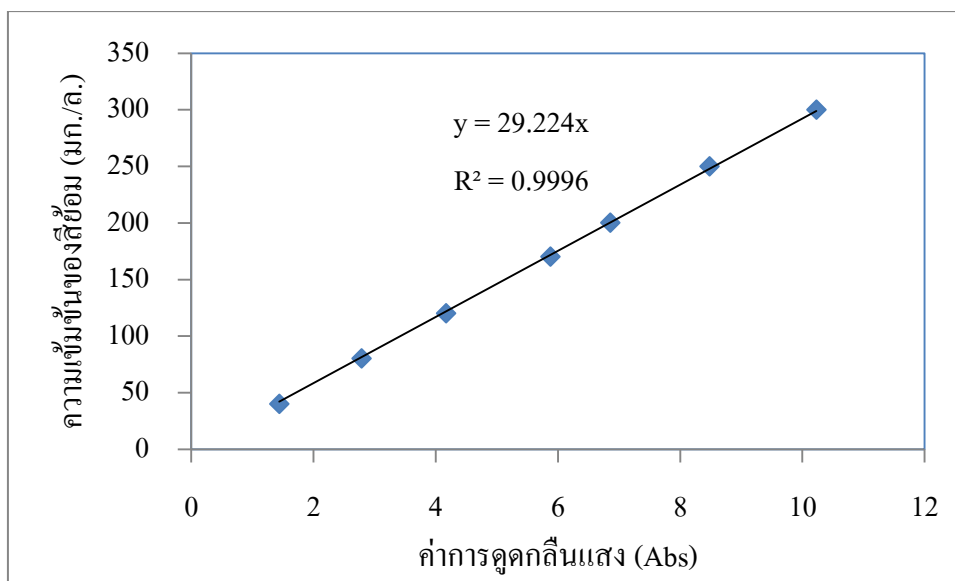
### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5 หรือ Remazol Black B) จากบริษัท Dystar Thai Co., Ltd โดยแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

- (1) การทดลองแบบแบทช์ (ในห้องปฏิบัติการ) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโทนสีดำของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผง ได้แก่ ขนาดอนุภาค และปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม โดยเปรียบเทียบจากการวิเคราะห์ผลทางจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับ
- (2) การทดลองในระบบไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone system) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ได้แก่ ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ( $P_{inlet}$ ) ขนาดของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ( $D_p$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ( $D_u$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ( $D_c$ )
- (3) การทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮโดรไซโคลน (Batch adsorption in Hydrocyclone system) เพื่อเปรียบเทียบทั้งจลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮบริด (ไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด) รวมถึงนำเสนอสมการทำนายผลการดูดซับ
- (4) การทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) ในระบบไฮบริดเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดำเนินการของระบบไฮบริด ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสียสีย้อมที่ต้องการบำบัด ( $Q$ ) ความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือ ปริมาณและระยะเวลาในการกักเก็บถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
- (5) การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม รวมถึงคำนวณค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

#### 4.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซับ

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/Visible spectrophotometer โดยใช้กราฟมาตรฐานจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมและค่าการดูดกลืนแสง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟโทนสีดำที่ใช้ในการวิจัย จะใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 130-150 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสีย้อมที่ไม่เป็นที่น่ารังเกียจผู้วิจัยประมาณว่าควรต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

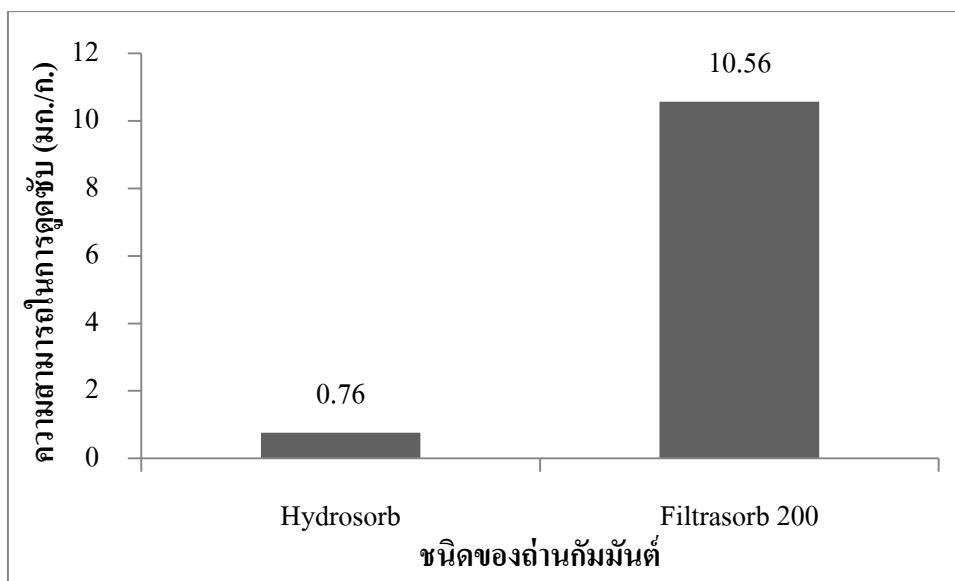


รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Black 5

#### 4.1.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

ทำการทดลองเบื้องต้นโดยใช้น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช และใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่มีขายตามท้องตลาด 2 ยี่ห้อ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของบริษัท Calgon carbon corporation และ ถ่านกัมมันต์ชนิด Hydrosorb bituminous coal base ของบริษัท Aquatic kinetic โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดผลิตจากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous)

จากผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.2 พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำนากกว่า Hydrosorb มาก โดยที่ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 มีความสามารถในการดูดซับ 10.56 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชนิด Hydrosorb bituminous coal base มีความสามารถในการดูดซับเพียง 0.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้อมูลทางการค้าจากตารางที่ 3.2 Hydrosorb มีค่า Iodine Number และพื้นที่ผิวมากกว่า Filtrasorb 200 ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับความสามารถในการดูดซับ นั่นคือการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับที่ไม่ขึ้นกับปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นในการทดลองทั้งหมดจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด Hydrosorb bituminous coal base และ Filtrasorb 200

#### สมบัติของถ่านกัมมันต์

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property) ของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดเคลือบ Filtrasorb 200 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 ทำได้โดยหาไอโซเทอมของการดูดซับ/คายซับด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77.35 K ข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย (1) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area,  $S_{BET}$ ) สามารถหาได้จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยสมการ BET (Brunauer–Emmett–Teller) (2) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume,  $V_p$ ) ประมาณได้จากปริมาณของแก๊สไนโตรเจนดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์  $p/p_0 = 0.99$  และขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณจาก  $D_p = 4V_p/S_{BET}$  (3) ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volumes,  $V_{mi}$ ) สามารถประมาณได้จากวิธีที-พล็อต (t-plot analysis) (4) ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore volume,  $V_{me}$ ) สามารถประมาณได้จากความแตกต่างระหว่างปริมาณรูพรุนรวมและปริมาณรูพรุนขนาดเล็ก และค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 27.39 อังสตรอม ซึ่งอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore, 20-500 Å) โดยมีปริมาณรูพรุนขนาดกลางร้อยละ 59.94 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผง

พารามิเตอร์	ปริมาณ		หน่วย
	Filtrisorb 200	Shirasagi S-10	
พื้นที่ผิวเบท (BET)	839.37	980	ตารางเมตรต่อกรัม
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย	27.39	19	อังสตรอม
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก	0.2302		ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง	0.3445	0.276	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
ปริมาตรรูพรุนรวม	0.5747		ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
ร้อยละรูพรุนขนาดกลาง	59.94		ร้อยละ

#### 4.1.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อความสามารถในการดูดซับ

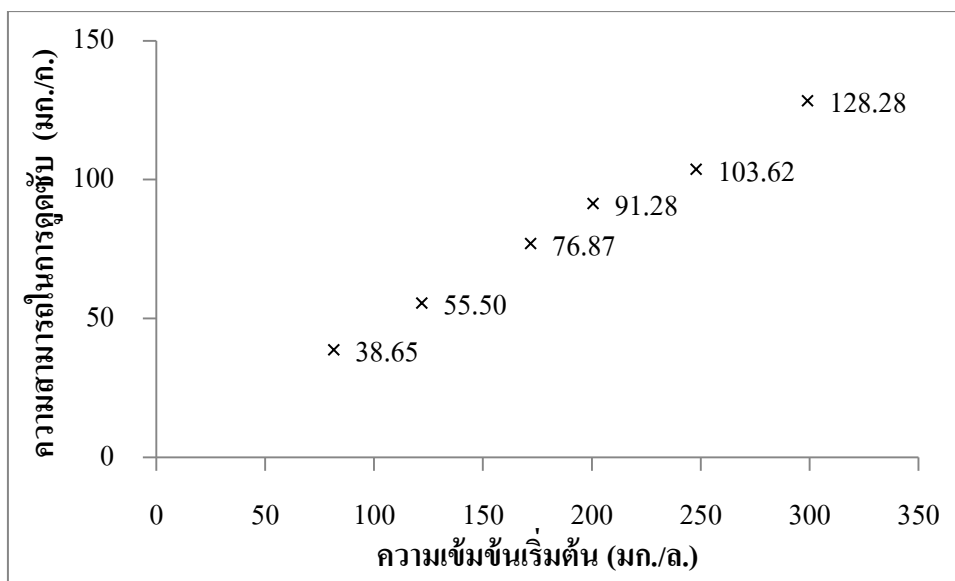
ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีค่า 80-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Filtrisorb 200) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 7 วัน โดยค่าความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (4.1)$$

$$\eta = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \quad (4.2)$$

โดย	$\eta$	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.)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass transfer) ชนิดหนึ่ง ที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับหรือสีย้อมนั้นจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ (Diffusion) จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยอาศัยแรงผลักดัน (Driving force) ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมจึงส่งผลให้ความเข้มข้นสีย้อมในสารละลายและความเข้มข้นสีย้อมที่ผิวของตัวดูดซับมีความแตกต่างกันมากขึ้น แรงผลักดันก็จะเพิ่มสูงขึ้น (Piccin และคณะ, 2012)

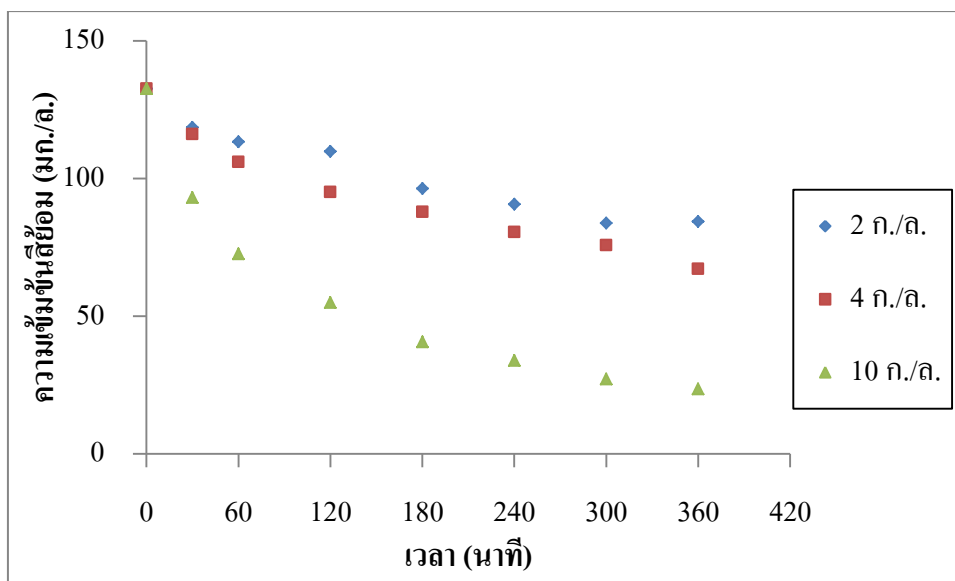


รูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน

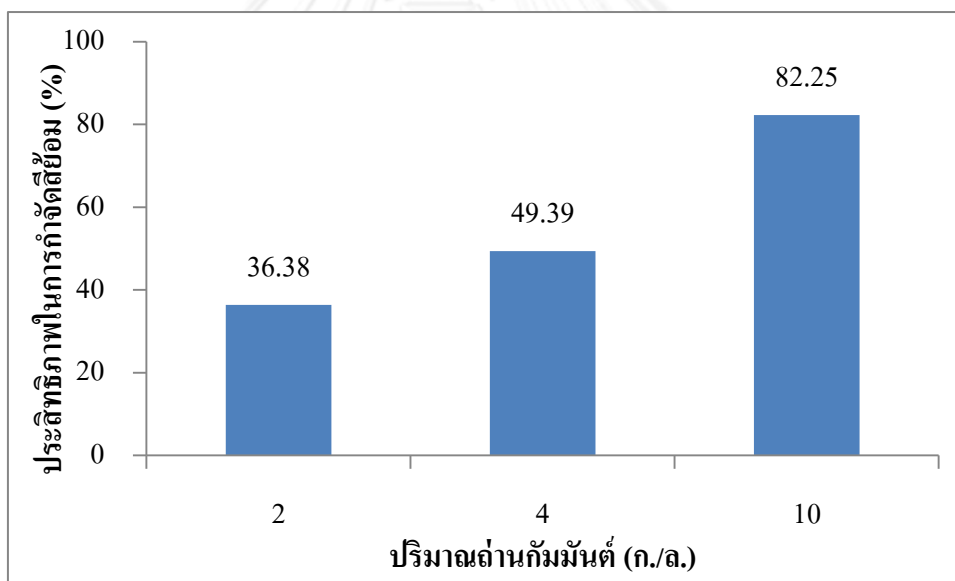
#### 4.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมเท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช ในปริมาณ 0.5-10 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.4 พบว่า การใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ต่ำ (2 กรัมต่อลิตร) มีแนวโน้มที่จะเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับสูงขึ้น แม้ว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จะส่งผลให้เวลาเข้าสู่สมดุลได้ช้า แต่เมื่อพิจารณาที่เวลาการทำปฏิกิริยาเดียวกัน พบว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มตัวกลางดูดซับเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสในการดูดซับ (Adsorption site) (Srivastava และคณะ, 2006) ดังนั้น เมื่อพื้นผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้นการดูดซับจึงเกิดได้มากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่เวลา 6 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์เป็นไปตามรูปที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร ในเวลา 6 ชั่วโมง สามารถกำจัดสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สูงถึงร้อยละ 82.25



รูปที่ 4.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 2 4 และ 10 กรัมต่อลิตร

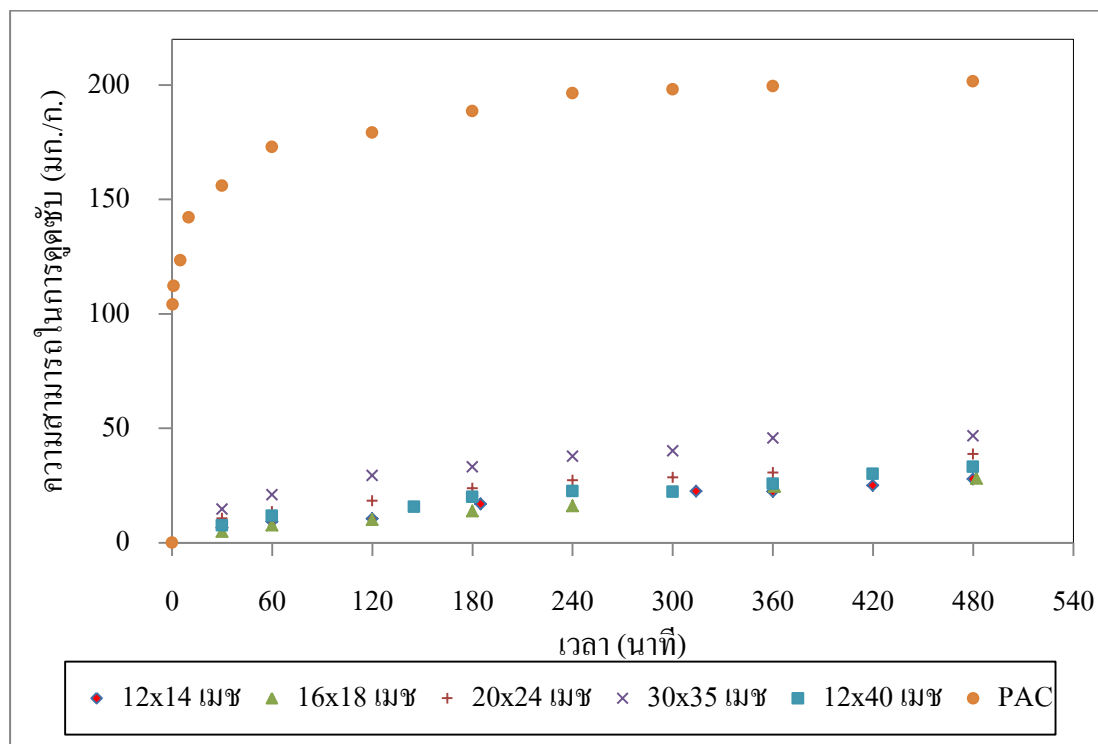


รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่เวลา 6 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน

#### 4.1.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมเท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อลิตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 4 ขนาดคือ 12x14 เมช (1410-1680 ไมโครเมตร) 16x18 เมช (1000-1160 ไมโครเมตร) 20x24 เมช (710-840 ไมโครเมตร) 30x35 เมช (500-590 ไมโครเมตร) และขนาดรวม 12x40 เมช (400-1680 ไมโครเมตร) ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการดูดซับกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ที่มีขนาด

ประมาณ 36.5 ไมครอน โดยอ้างอิงผลการทดลองจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโทเนสสีดำด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ปรากฏศิริ ศรีศุภพัชร, 2551)



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ Filtrasorb 200 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ต่างกัน

โดยทั่วไปการใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของตัวดูดซับ เพราะพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน (กฤษณ์ พลรัตน์, 2547) แต่จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์เล็กลง สามารถอธิบายได้จากลักษณะทางกายภาพของโมเลกุลสีย้อมรีแอกทีฟโทเนสสีดำที่มีขนาด  $3.61 \times 1.23$  นาโนเมตร ในขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Filtrasorb 200) มีขนาดเท่ากับ 2.74 นาโนเมตร และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Shirasagi S-10) มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 1.90 นาโนเมตร เนื่องจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เป็นผลให้กลไกการดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับภายนอกรูพรุน ซึ่งขนาดของอนุภาคสีย้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ นั่นคือในกรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน อนุภาคตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

#### 4.1.5 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

จากข้อมูลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาอันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับเพื่ออธิบายกระบวนการของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 และถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่เกิดขึ้นได้ โดยทำการเปรียบเทียบจาก



สมการอันดับปฏิกิริยา คือ (1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) (2) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) และ (3) ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion) ดังที่แสดงในสมการที่ (3.1)-(3.3) ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e + \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4.3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.4)$$

$$q_t \approx k_p t^{0.5}$$

$$k_p = \frac{6q_e}{R} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad (4.5)$$

นำข้อมูลการดูดซับมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นของทั้งสามปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.2 และหาค่าคงที่  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $q_e$  และ  $k_p$  จากการคำนวณความชันและจุดตัดแกน  $y$  ของกราฟ ได้ข้อมูลแสดงค่าคงที่และตัวแปรของแต่ละปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแต่ละปฏิกิริยาทางจลนศาสตร์

ปฏิกิริยา	แกน X	แกน Y	ความชัน	จุดตัดแกน Y
อันดับหนึ่งเสมือน	$t$	$\log(q_e - q_t)$	$\frac{k_1}{2.303}$	$\log q_e$
อันดับสองเสมือน	$t$	$\frac{t}{q_t}$	$\frac{1}{q_e}$	$\frac{1}{k_2 q_e^2}$
การกระจายตัวภายในอนุภาค	$t^{0.5}$	$q_t$	$k_p$	-

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยา

สารดูดซับ	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน		ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค	
	$R^2$	$k_1$ (นาที <sup>-1</sup> )	$R^2$	$k_2$ (ก./มก.- นาที)	$k_2 q_e^2$ (มก./ก.- นาที)	$R^2$	$k_p$ (มก./ก. นาที <sup>0.5</sup> )
- 12x40	0.9819	0.0012	0.9378	0.00013	0.2269	0.9835	1.4483
- 30x35	0.9595	0.0010	0.9894	0.00011	0.4849	0.9722	2.3635
- 20x24	0.9816	0.0015	0.9443	0.00014	0.2991	0.9849	1.7128
- 16x18	0.9886	0.0011	0.8223	0.00006	0.1321	0.9309	1.1657
- 12x14	0.9828	0.0009	0.9182	0.00013	0.1786	0.9761	1.2201
PAC	0.9461	0.0108	0.9988	0.00089	35.8423	0.5106	19.76

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นที่ได้ตั้งตารางที่ 4.3 แสดงถึงลักษณะในการดูดซับสีย้อมของ ถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดเกล็ดแต่ละขนาด (Filtrisorb 200) และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Shirasagi S-10) จากการวิเคราะห์โดยรวมพบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เสมือนมากกว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Cardoso (Cardoso และคณะ, 2011) ในขณะที่จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสอง เสมือนอย่างชัดเจน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient:  $R^2$ ) สูงถึง 0.9988 ซึ่งมากกว่าปฏิกิริยาอันดับอื่นๆ จากการเปรียบเทียบผลของขนาดตัวกลางดูดซับจากค่าคงที่ปฏิกิริยา อันดับที่หนึ่งเสมือน ( $k_1$ ) พบว่าตัวกลางดูดซับที่มีขนาดเล็กกลองมีอัตราการดูดซับที่สูงกว่า สังเกตได้จาก ค่า  $k_1$  ที่มีค่ามากขึ้น

ถัดมาเป็นการเปรียบเทียบจลนศาสตร์เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นและปริมาณเริ่มต้น ของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น โดยจะใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรในการกำจัดสีย้อมที่มีความ เข้มข้นเริ่มต้น 132.5 และ 265 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่ได้พบว่า เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ เพิ่มขึ้นจากก่อนหน้าที่ใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อลิตร เป็น 10 กรัมต่อลิตร ผลจาก แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของการดูดซับมีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมากกว่า อีก ทั้งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นให้สูงขึ้นเป็น 265 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองมีความ สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา อันดับสองเสมือน ( $k_2$ ) ซึ่งแสดงถึงปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ (กรัม) ในการกำจัดสีย้อม 1 มิลลิกรัม ใน หนึ่งหน่วยเวลา (นาที) นั่นคือ หากค่า  $k_2$  มีค่าน้อยแสดงว่าสามารถดูดซับสีย้อมได้มากเมื่อใช้ปริมาณ ตัวดูดซับเท่ากัน พบว่าค่า  $k_2$  ของการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 265 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเพียง  $3.6 \times 10^{-4}$  กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $k_2$  ของการดูดซับที่ความเข้มข้น 132.5 มิลลิกรัม ต่อลิตรที่มีค่า  $10.6 \times 10^{-4}$  กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที ความสัมพันธ์ของค่า  $k_2$  กับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้ จากผลการทดลองสอดคล้องกับทางทฤษฎีการดูดซับที่ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น (อิสริยาภรณ์ บุญยี่น, 2552)

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น สีย้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน		ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน		
	$R^2$	$k_1$ (นาที <sup>-1</sup> )	$R^2$	$k_2$ (ก./มก. นาที)	$k_2 q_e^2$ (มก./ก. นาที)
132.5	0.9778	0.0044	0.9986	0.00036	0.18
265	0.9777	0.0037	0.9924	0.00106	0.23

#### 4.1.6 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ในการทดลองเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ ทดลองโดยใส่ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 กรัม ในน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 70-900 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส และในการทดลองนี้จะใช้เวลาในการดูดซับ 7 วัน (Al-Degs และคณะ, 2007) เนื่องจากผลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับในเวลา 8 ชั่วโมงไม่พบความเข้มข้นที่จุดสมดุลจึงเพิ่มเวลาในการดูดซับให้มากพอที่ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ ( $q_e$ ) และความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ )

ผลจากการทดลองที่ได้ตั้งรูปที่ 4.7 นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Nonlinear regression approach) เพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องกับแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) มีรูปแบบสมการตามสมการที่ (4.6) หรือฟรุนดลิชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) มีรูปแบบสมการตามสมการที่ (4.7) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นนี้ทำให้ได้ค่าคงที่ของทั้งสองแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient:  $R^2$ ) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอม มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าของแบบจำลองฟรุนดลิชไอโซเทอม แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Nonnormalized Root Mean Square, Non-RMS) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลองทางทฤษฎี ค่า Non-RMS ที่น้อยกว่าหมายความว่าแบบจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมาก ซึ่งพบว่าแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีค่า Non-RMS ที่น้อยกว่าของไอโซเทอมของแลงเมียร์ ดังนั้นไอโซเทอมของฟรุนดลิชจึงเหมาะสมสำหรับใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟที่โตนีสีดำด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 และชนิดผง Shirasagi S-10

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

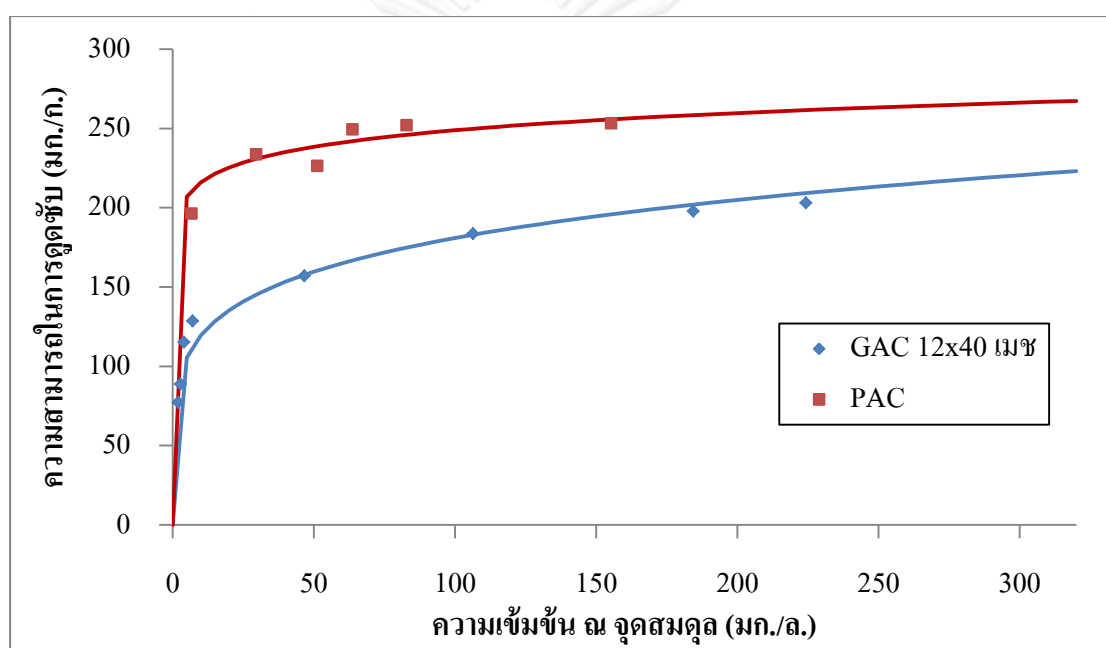
$$q_e = K C_e^{1/n} \quad (4.7)$$

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

$$\text{Nonnormalized RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (q_{ei,cal} - q_{ei,exp})^2 / N} \quad (4.8)$$

เมื่อ  $q_{ei,cal}$  คือ ค่าความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณทางทฤษฎี  
 $q_{ei,exp}$  คือ ค่าความสามารถในการดูดซับจากผลการทดลอง  
 N คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดลิชจากรูปที่ 4.7 พบว่า เส้นความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) มีค่ามากกว่าเส้นความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) เป็นผลจากความแตกต่างของขนาดตัวดูดซับซึ่งตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะแสดงความสามารถในการดูดซับที่มากกว่าดังผลการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $q_m$ ) จากไอโซเทอมของแลงก์เมียร์ในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบข้อมูลการดูดซับจากการทดลองกับแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb ขนาด 12x40 เมช และชนิดผง Shirasagi S-10

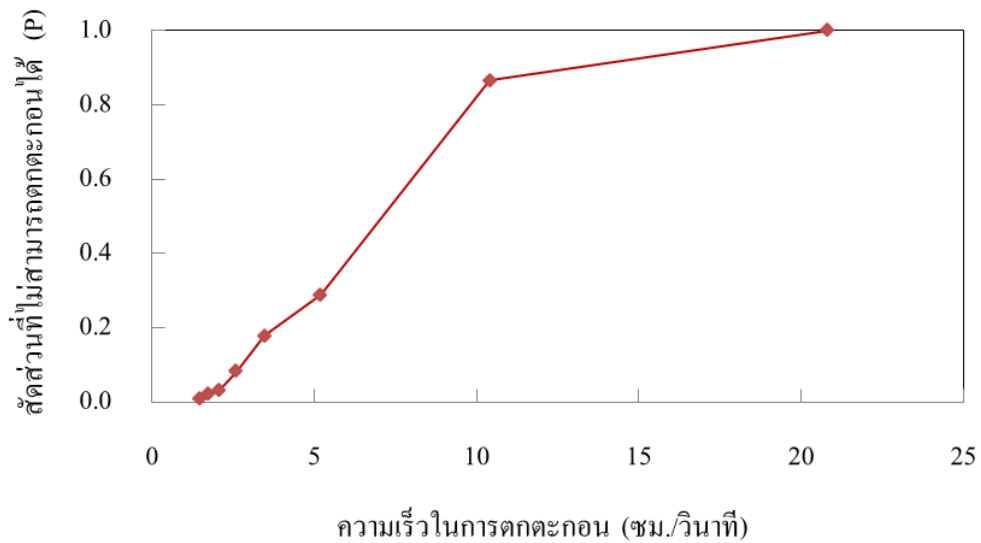
ตารางที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับ

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมของแลงก์เมียร์				ไอโซเทอมของฟรุนดลิช			
	Non-RMS	$R^2$	$b$ (L/mg)	$q_m$ (mg/g)	Non-RMS	$R^2$	K (L/g)	1/n
GAC								
- 12x40	27.15	0.9762	0.3487	189	24.32	0.9371	78.85	0.1803
- 30x35	66.19	0.9237	0.3190	270	42.03	0.9429	96.96	0.2136
- 20x24	38.23	0.8762	0.1574	294	12.42	0.9810	123.54	0.1681
- 16x18	12.31	0.9648	0.3702	115	13.35	0.9398	39.98	0.3018
- 12x14	19.95	0.9267	0.3266	123	19.27	0.9206	38.34	0.3560
PAC	26.48	0.4927	0.2708	256	18.53	0.5523	187.33	0.0616

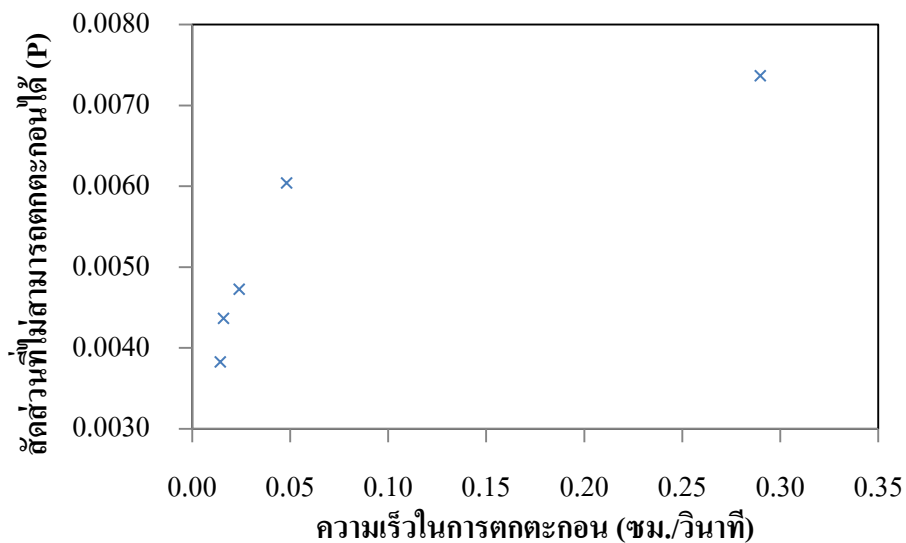
จากที่การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช จึงสามารถอธิบายได้ว่า พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) และเป็นการดูดซับแบบผันกลับได้ (Reversible adsorption) เกิดการดูดซับแบบไม่จำเพาะเจาะจงตำแหน่ง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงมีอิสระในการจับหรือเกาะได้ทั่วพื้นผิวของตัวดูดซับที่บริเวณใดก็ได้ (นพภาพร พานิช และคณะ, 2550) โดยการเกาะเรียงตัวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นลักษณะการเรียงตัวแบบหลายชั้น (Multi-layer formation) ซึ่งจากลักษณะของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชที่เป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ตรงตำแหน่งที่มีการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลาย และเมื่อพิจารณาค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ ( $1/n$ ) ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการ จากการทดลองที่แสดงดังตารางที่ 4.5 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) มีค่า  $1/n$  ต่ำที่สุด โดยเส้นไอโซเทอมฟรุนดลิชที่มีค่า  $1/n$  มากการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง หมายความว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากัน การดูดซับที่มีค่า  $1/n$  มากกว่า จะมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าและลดความเข้มข้นได้ต่ำกว่าการดูดซับที่มีค่า  $1/n$  น้อย ในขณะที่การดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำของการดูดซับที่มีค่า  $1/n$  มาก จะมีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าการดูดซับที่มีค่า  $1/n$  น้อย ในทางปฏิบัติถ้าเส้นไอโซเทอมมีความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อนำไปใช้ในระบบต่อเนื่อง (Continuous Treatment) ในทางกลับกันถ้าเส้นไอโซเทอมมีความชันน้อยมีความเหมาะสมที่จะใช้กับระบบแบบแบทช์ (Batch Treatment) (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545) ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Filtrisorb 200) มีค่า  $1/n$  มากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Shirasagi S-10) จึงเหมาะสมในการนำถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดไปใช้กับระบบต่อเนื่องในงานวิจัยครั้งนี้มากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง

#### เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผงออกจากเฟสน้ำด้วยการตกตะกอน

การแยกโดยใช้ห้องตกตะกอนเป็นการแยกโดยอาศัยความเร็วในการตกตะกอนอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational settling velocity) สามารถหาได้จากผลการทดลองการตกตะกอนแบบโดดในคอลัมน์ทดสอบ (Discrete settling in column test) ในที่นี้เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช และถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาตกตะกอนในคอลัมน์ทดสอบ เก็บน้ำตัวอย่างที่ระดับความลึกต่างๆ พร้อมทั้งบันทึกเวลาเก็บตัวอย่างแล้วนำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอย (ปริมาณถ่านกัมมันต์) และนำข้อมูลมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้ (Penetration, P) กับความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค (Settling velocity, v) หรือค่าอัตราน้ำล้นผิว โดยที่ค่า P ได้จากค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยของตัวอย่างที่เวลาใด ๆ เทียบกับปริมาณที่เวลาเริ่มต้น ส่วนความเร็วในการตกตะกอนหาได้จากความลึกของจุดเก็บตัวอย่างหารด้วยเวลาที่เก็บตัวอย่าง (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนที่ค่าอัตราน้ำล้นผิวต่างๆ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ประสิทธิภาพการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยรูปที่ 4.8 (สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด) รูปที่ 4.9 (สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดผง) และสมการที่ (4.9) โดยการแทนค่าอัตราน้ำล้นผิวต่างๆ ( $v_0$ ) ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.2 ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 จากผลการคำนวณที่ได้จะเห็นว่าการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำให้ได้ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 นั้น การออกแบบถังตกตะกอนสำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดต้องมีค่าอัตราน้ำล้นผิวที่น้อยกว่า 2 ชม.ต่อวินาที และสำหรับการตกตะกอนของถ่านกัม

มันต์ชนิดผงค่าอัตราน้ำล้นผิวควรจะออกแบบให้น้อยกว่า 0.29 ซม.ต่อวินาที ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดยากต่อการแยกด้วยระบบการตกตะกอนเนื่องจากมีอัตราเร็วของการตกตะกอนที่ช้ามาก

$$\eta_{\text{sedimentation}} = (1 - P_0) + \int_0^{P_0} (V_i/V_0) dP_i \quad (4.9)$$

ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงจะดูดซับได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด แต่ถ่านกัมมันต์ชนิดผงตกตะกอนได้ช้ากว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาก การที่ตัวดูดซับตกตะกอนได้ไม่ดีจะส่งผลกระทบต่อ การแยกตัวดูดซับออกจากเฟสน้ำหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียเสียอ้อมในถังกวนผสมแบบต่อเนื่อง ที่อัตราเร็วในการตกตะกอนน้อยจะต้องการพื้นที่ของถังตกตะกอนมาก การลดพื้นที่การตกตะกอน สามารถทำได้โดยการเร่งอัตราเร็วในการตกตะกอนให้สูงขึ้น อาศัยอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มแรงเหวี่ยงหนี ศูนย์กลาง เช่น ไฮโดรไซโคลอน ข้อดีของการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอนนอกจากใช้พื้นที่การตกตะกอนน้อยลง ยังรองรับอัตราการไหลที่สูงขึ้นได้ ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากเฟสน้ำด้วยไฮโดรไซโคลอนแสดงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ

$U_0$ (ซม./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

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ

$U_0$ (ซม./วินาที)	$P_0$	$\eta_{\text{Sedimentation}}$
0.0016	0.0044	99.87
0.024	0.0047	99.57
0.048	0.0060	99.52
0.29	0.0074	99.45

## 4.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลอน

### 4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันจ่ายเข้าสู่ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลอน ( $P_{inlet}$ )

#### ไฮโคลน ( $P_{inlet}$ )

ทำการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์คัตขนาด 12x14 เมช ปริมาณ 150 กรัม ใส่ลงในถังกวนผสมที่มีน้ำประปา 300 ลิตร ในขั้นตอนนี้เลือกใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลอน 9 มิลลิเมตร ทำการทดลองเดินระบบโดยปรับความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนที่ 0.5 1 และ 2 บาร์ เก็บตัวอย่างของผสมที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกส่วนบน (Overflow) และทางออกส่วนล่าง (Underflow) ที่เวลา 30 60 120 180 240 300 และ 360 นาที ตามลำดับ และนำตัวอย่างของผสมมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) และคำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไซโคลอน จากสมการประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สมการที่ (4.10) (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.1)

$$E'_T = \left( \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100 \quad (4.10)$$

เมื่อ  $E'_T$ ,  $E_T$  และ  $R_f$  คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลอน ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอน และอัตราส่วนการแบ่งการไหล (Flow split) ตามลำดับ

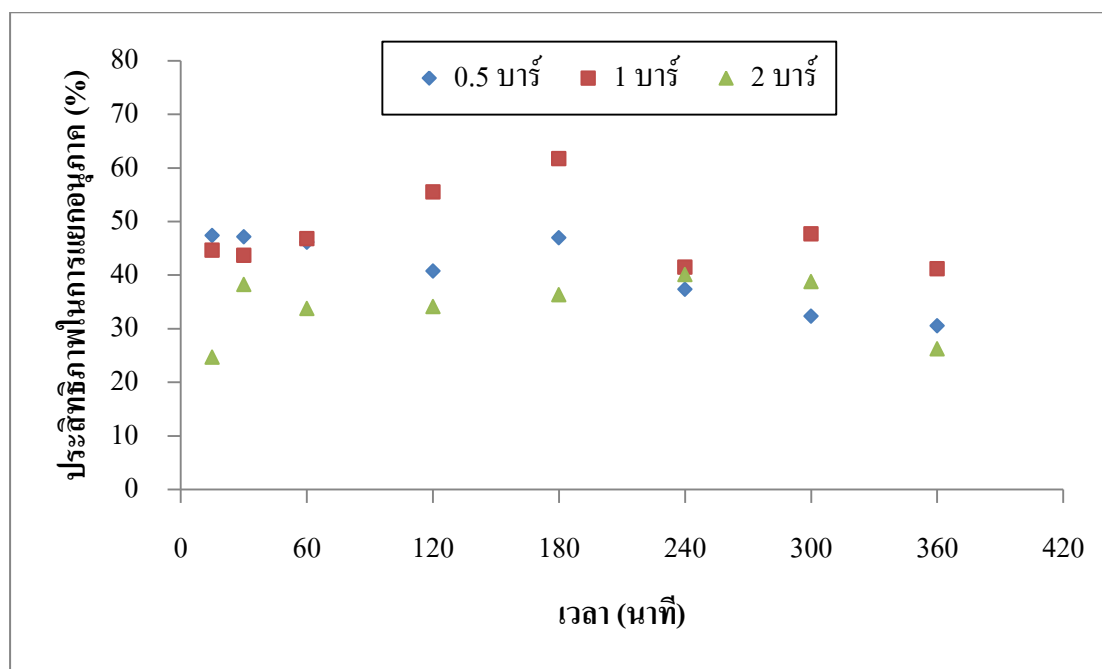
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1) เมื่อเปรียบเทียบผลของความดันจ่ายเข้าที่ 0.5 และ 1 บาร์ พบว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจ่ายเข้าเปรียบได้กับการเพิ่มอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลอน โดยความสัมพันธ์เป็นดังตารางที่ 4.8 จากอัตราการไหลที่สูงขึ้นความเร็วตามแนวสัมผัสรอบวง ( $V_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$ ) สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ความเร่งหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ( $a_c = \frac{2V_y^2}{D_c}$ ) และเนื่องจากความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนเป็นตามสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) คือ  $U_T = \frac{a_c(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu}$  จะเห็นได้ว่าความเร่งหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นความเร็วของอนุภาคในการตกตะกอนก็จะสูงขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น (วรศิริเสียงสนัน, 2552)

(2) ในทางกลับกันเมื่อเปรียบเทียบผลของความดันจ่ายเข้าที่ 1 และ 2 บาร์ พบว่าเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคลดลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับทฤษฎีข้างต้น ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากความดันที่สูงขึ้นทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear-forces) และความปั่นป่วน (Turbulence) ที่มากเกินไปภายในไฮโดรไซโคลอน ส่งผลให้อนุภาคของถ่านกัมมันต์เกิดการแตกและมีขนาดเล็กลง ซึ่งจากสมการกฎของสโตค ขนาดของอนุภาคก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อ



ความเร็วของการตกตะกอน ดังนั้นเมื่อถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กลงความเร็วของการตกตะกอนจึงน้อยลงด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนต่ำลง (Dwari และคณะ, 2004; Husveg และคณะ, 2007) ดังนั้นจึงเลือกใช้ความดันจ่ายเข้าที่ 1 บาร์ ในการทดลองต่อไป และจากการอ่านค่าความดันจากเครื่องวัดความดันที่จุดจ่ายเข้าและออกไฮโดรไซโคลน พบว่าค่าความดันลดเท่ากับค่าความดันจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าต่างกัน

ตารางที่ 4.8 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกต่างๆของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าแตกต่างกัน

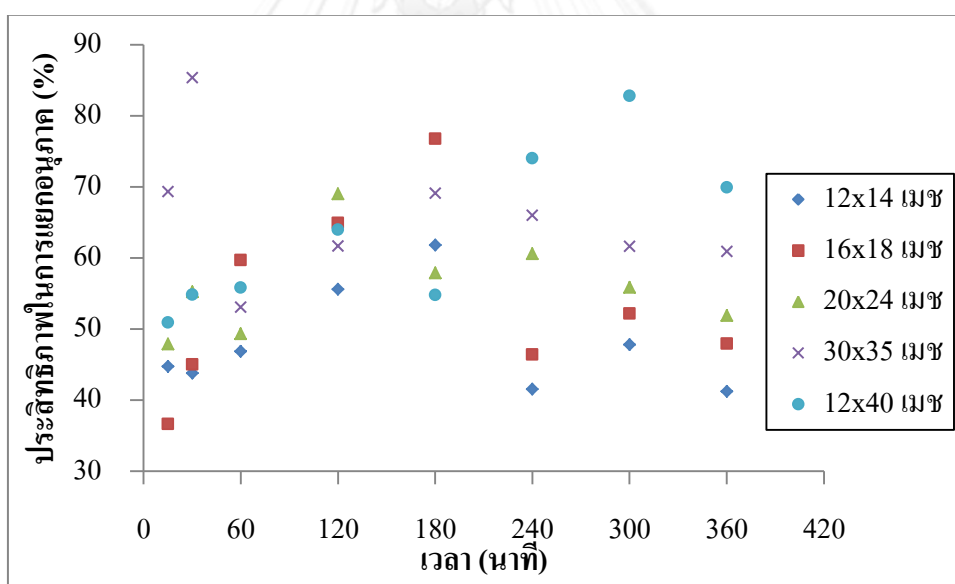
ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล		
	ทางออกด้านล่าง (ลิตร/วินาที)	ทางออกด้านบน (ลิตร/วินาที)	ทางเข้าไฮโดรไซโคลน (ลิตร/วินาที)
0.5	0.051	0.551	0.602
1	0.064	0.716	0.780
2	0.076	1.181	1.257

#### 4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วย ไฮโดร

##### ไซโคลน ( $D_p$ )

ทำการทดลองโดยเลือกใช้ความดันที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าคือ 1 บาร์ ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ทดลองกับถ่านกัมมันต์ขนาด 12x14 16x18 20x24 30x35 และ 12x40 เมช ตามลำดับ และเก็บตัวอย่างของผสมตามเวลาเช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้า

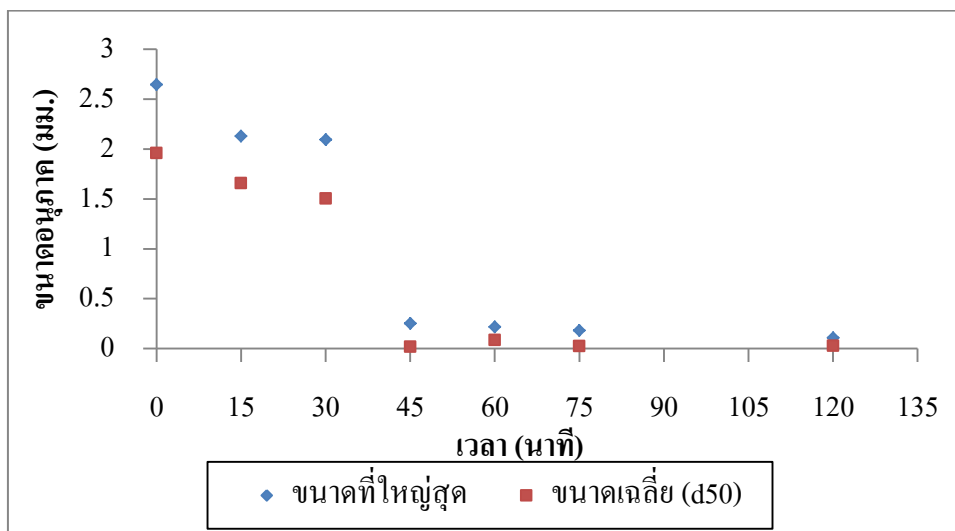
จากผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดเล็กลง ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า ประสิทธิภาพในการแยกจะลดลงเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ซึ่งทฤษฎีนี้เป็นจริงเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาค แต่ในการทดลองอนุภาคที่ใช้เป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งสมบัติทางกายภาพมีความเป็นโพรงมากจึงมีโอกาสแตกได้ และผลของขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่ามีแนวโน้มที่จะชนกับใบพัดเครื่องสูบน้ำมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก และ/หรือ อาจเกิดจากแรงเฉือนซึ่งการที่วัตถุมีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ในการรับแรงกระทำมากกว่าวัตถุขนาดเล็ก ดังนั้นอนุภาคใหญ่จึงมีแนวโน้มที่จะแตกมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ

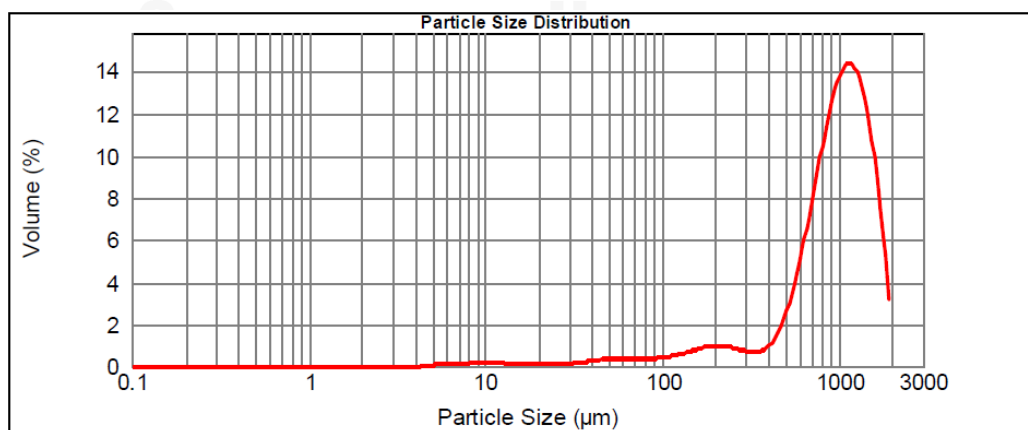
เนื่องจากเกิดการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ จึงนำตัวอย่างจากช่องทางออกส่วนล่างมาวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่เวลาต่างๆ ทำการวัดขนาดอนุภาคโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล แล้วนำภาพที่ได้มาวัดขนาดด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (Image Fame Work ของบริษัท Tarosoft) และนำข้อมูลขนาดอนุภาคที่ได้หาค่าของขนาดใหญ่ที่สุดที่ตรวจพบและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค ( $d_{50}$ ) ผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลง และหลังการเดินระบบเป็นเวลานานกว่า 30 นาที พบว่า อนุภาคมีขนาดเป็นวง

ละเอียด จึงทำการวิเคราะห์อีกครั้งด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersize 2000 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13

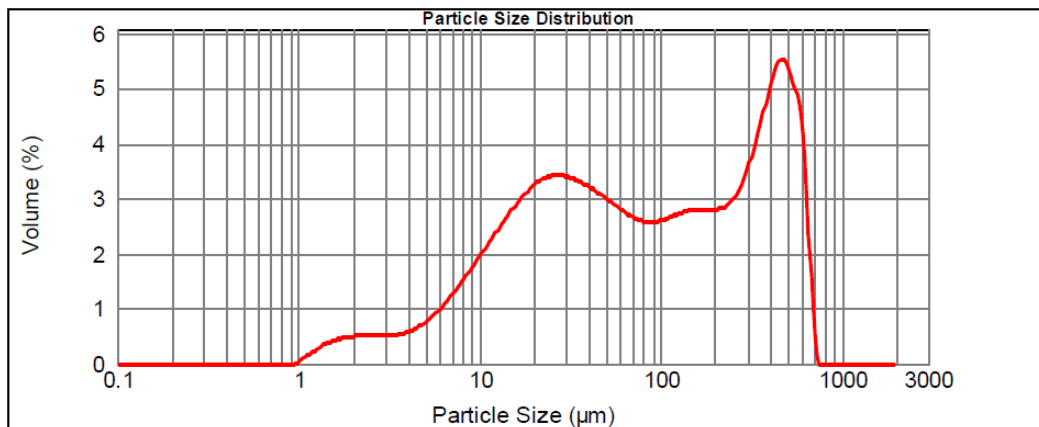


รูปที่ 4.12 ผลการวัดขนาดอนุภาคตามเวลาด้วยกล้องจุลทรรศน์

จากผลของประสิทธิภาพการแยกที่ได้และผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่เปลี่ยนไปตามเวลา ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลอนมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการทดลองในขั้นตอนนี้จะหมุนเวียนน้ำและถ่านกัมมันต์ภายในระบบตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปถ่านกัมมันต์จึงมีโอกาสแตกและขนาดเล็กลงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจากแตกของอนุภาคจึงได้ทดสอบหาสาเหตุด้วยการเปิด-ปิดใบพัดกวนผสม และเปิด-ปิดเครื่องสูบน้ำ ผลการทดสอบพบว่า การแตกของอนุภาคเป็นผลจาก (1) ถ่านกัมมันต์กระทบกับใบพัดในถังกวนผสม และเส้นทางการหมุนเวียนน้ำซึ่งเกิดการแตกในระหว่างก่อนเข้าไฮโดรไซโคลอน และ/หรือ (2) แรงเฉือนและความปั่นป่วนภายในไฮโดรไซโคลอนดังเช่นผลการทดลองก่อนหน้านี้



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



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



ค.)                      ที่เวลา 0 นาที                      ที่เวลา 30 นาที

รูปที่ 4.13 ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์

ก.) ที่เวลา 0 นาที                      ข.) ที่เวลา 30 นาที

ค.) รูปเปรียบเทียบขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ 0 และ 30 นาที

#### 4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่างของไฮโดร

##### ไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ( $D_u$ )

วัตถุประสงค์ในการแยกของผสมด้วยไฮโดรไซโคลนต้องการให้ทางออกส่วนล่างมีเฉพาะของแข็งหรืออนุภาค และมีเพียงน้ำใสออกที่ทางออกส่วนบน แต่ในความเป็นจริงนั้นที่ทางออกส่วนล่างย่อมมีน้ำปะปนออกมาด้วยเสมอ ซึ่งการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกส่วนล่างสามารถลดสัดส่วนของน้ำที่ออกทางช่องทางออกส่วนล่างได้ แต่การลดขนาดช่องทางออกส่วนล่างนั้น

จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง ประสิทธิภาพที่ลดลงแตกต่างกันหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ความเข้มข้นและขนาดของของแข็ง และ/หรือความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน (Saengchan, 2009)

ในการทดลองนี้เมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่างจาก 9 มิลลิเมตร เป็น 4 มิลลิเมตร แล้วทำการทดลองตามการศึกษาผลของความดันจ่ายเข้า (ผลการทดลองที่ 4.2.1) เมื่อนำตัวอย่างจากช่องทางออกทั้งสามมาวิเคราะห์พบว่า การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกส่วนล่างส่งผลให้ความดันภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลจากขนาดของช่องทางออกส่วนล่างที่เล็กเกินไป ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์บางส่วนเกิดการสะสมบริเวณส่วนปลายกรวยของไฮโดรไซโคลน จนกระทั่งเกิดการสะสมมากขึ้นจนกีดขวางเส้นทางการไหลบริเวณทางออกส่วนล่าง เป็นเหตุให้ความดันในระบบเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่าง 9 มิลลิเมตร ในการทดลองต่อไป

#### 4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (D<sub>c</sub>)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 75 มิลลิเมตร ซึ่งการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยก กล่าวคือ ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะแยกอนุภาคได้ขนาดตัดที่เล็กกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ แต่จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ไม่สามารถแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ให้ได้ประสิทธิภาพถึงร้อยละ 100 ดังนั้นการใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 มิลลิเมตร จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

จากผลการทดลองที่ 4.2 ทำให้ได้สถานะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เกิดขึ้นได้สูงสุด คือ ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน 1 บาร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์นี้ ส่งผลดีต่อทั้งกระบวนการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนและกระบวนการดูดซับ ดังผลการทดลองที่ 4.1 อย่างไรก็ตามการทดลองในขั้นตอนต่อไปจำเป็นต้องใช้ถ่านกัมมันต์จำนวนมากในการทดลอง ซึ่งการคัดขนาดถ่านกัมมันต์ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการทำวิจัย และในการใช้งานจริงโดยมากมักจะเป็นลักษณะการใช้งานโดยไม่ผ่านการคัดขนาด เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในการทดลองต่อไป จึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์โดยไม่ผ่านการคัดขนาดคือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมช

#### 4.2.5 เปรียบเทียบการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดโดยใช้ไฮโดรไซโคลนกับการตกตะกอนแบบ

##### ธรรมดา

ในการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์โดยใช้ไฮโดรไซโคลน จะใช้ข้อมูลจากผลการศึกษาอิทธิพลของความดันจ่ายเข้าต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลนที่ได้ตั้งตารางที่ 4.8 โดยนำข้อมูลอัตราการไหลที่ความดัน 0.5 1 และ 2 บาร์ มาคำนวณหาความเร็วในการตกตะกอนอันเนื่องมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อใช้ประมาณประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนของทั้งสามความดันจ่ายเข้า จากสมการที่ (4.11) และสมการที่ (4.12)

$$U_T = \frac{(\rho_p - \rho)d_p^2 2V_c^2}{18\mu D_c} \quad (4.11)$$

$$\eta_{\text{mixed flow}} = 1 - \exp\left\{-\frac{\pi N_e V_y d_p^2 (\rho_p - \rho)}{9\mu D_i}\right\} \quad (4.12)$$

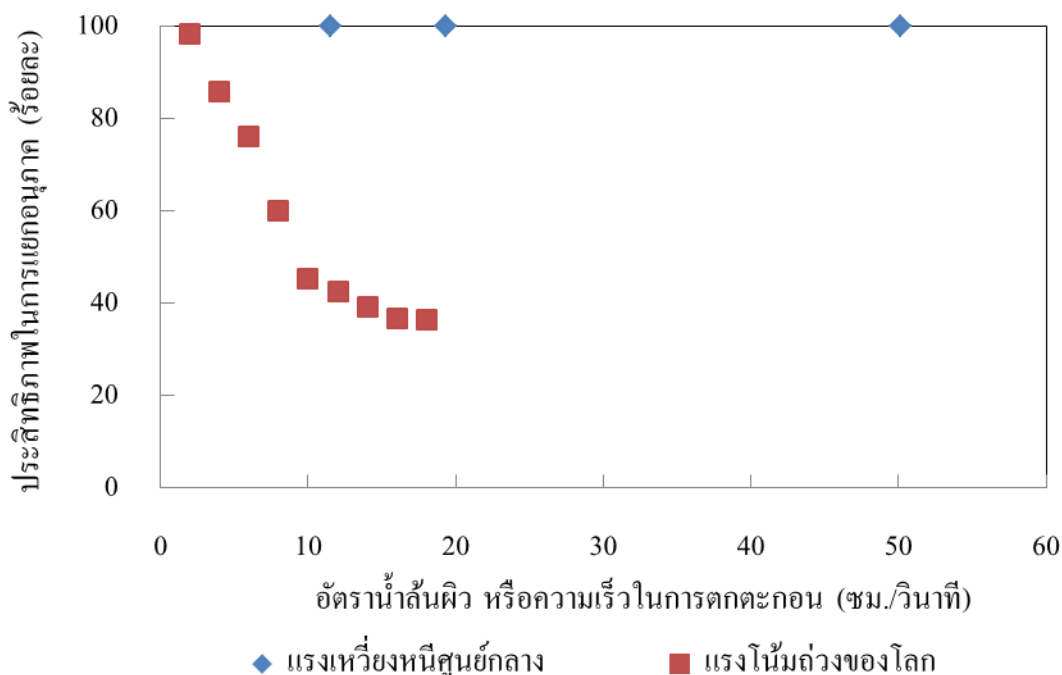
โดย  $U_T$  คือ ความเร็วสุดท้ายในการแยกของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน (ชม./วินาที)

ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 1004.736 ไมโครเมตร (สมมติว่าอนุภาคถ่านกัมมันต์ไม่มีการแตก) ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ ( $\rho_p$ ) 2110 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น ( $\rho$ ) และความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ( $\mu$ ) ของน้ำเท่ากับ 995.65 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.000798 นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งพบว่าความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนทั้งสามมีประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ขนาด 12x14 เมช ได้ร้อยละ 100

ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลผลการคำนวณหาความเร็วสุดท้ายในการแยกของอนุภาค

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

จากนั้นนำข้อมูลประสิทธิภาพในการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนและการตกตะกอนมาเปรียบเทียบกัน ข้อมูลประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจากทั้งสองอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเท่ากัน พบว่าอัตราน้ำล้างผิวของการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนมีค่ามากกว่า นั่นคือการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนจะใช้พื้นที่และเวลาในการแยกน้อยกว่าการใช้ถังตกตะกอน



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรไซโคลนและการตกตะกอนแบบโดด

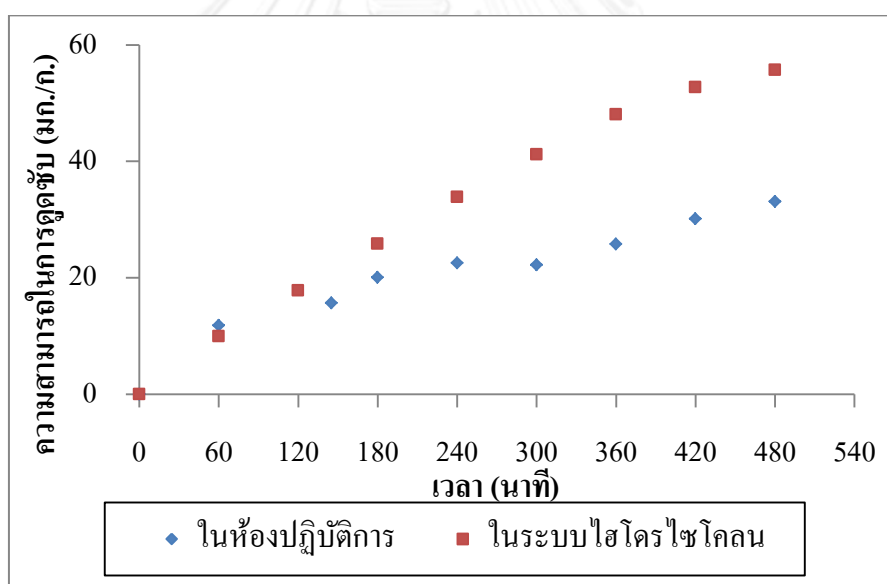
#### 4.3 ผลการศึกษาการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด (Batch Adsorption in Hybrid system)

หลังจากที่ได้จำลองศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับในการทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในห้องปฏิบัติการและทราบพารามิเตอร์ที่ใช้เดินระบบของไฮโดรไซโคลนที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการแยกถ่านกัมมันต์แล้ว จะนำข้อมูลทั้งสองมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮโดรไซโคลน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมและนำข้อมูลไปใช้ในการทดลองการดูดซับในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่อง

##### 4.3.1 จลนศาสตร์ของการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด

การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับในระบบนี้ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกส่วนล่าง 9 มิลลิเมตร และเดินระบบที่ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 300 ลิตร ในถังกวนผสม โดยมีความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเดินระบบไฮโดรไซโคลนแล้วจึงเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ลงในถังกวนผสม และเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางออกส่วนบน (Overflow) ตามเวลาจนครบ 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ ( $C_t$ ) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร ใช้วิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับการทดลองการดูดซับในห้องปฏิบัติการ (การทดลองที่ 4.1) แล้วทำซ้ำขั้นตอนเดิมโดยเปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 1 และ 0.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองทางจลนศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นในระบบไฮโดรไลโคลนกับในห้องปฏิบัติการเป็นดังรูปที่ 4.15 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ในระบบไฮโดรไลโคลนมีค่าสูงกว่าผลการดูดซับสีย้อมในห้องปฏิบัติการ และเมื่อวิเคราะห์อัตราเร็วในการดูดซับด้วยสมการจลนศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนแสดงดังตารางที่ 4.10 ค่า  $k_2q_e^2$  ซึ่งแสดงถึงปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับด้วยสารดูดซับ 1 กรัม ในเวลา 1 นาที เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้งสองระบบพบว่าในระบบไฮโดรไลโคลนมีค่าสูงกว่าในห้องปฏิบัติการโดยมีค่าเท่ากับ 0.1702 และ 0.1075 มก./ก.-นาที อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ในระบบไฮโดรไลโคลนที่สูงกว่า มีสาเหตุอันเนื่องมาจากอุณหภูมิในระบบไฮโดรไลโคลนเป็นไปตามสภาวะแวดล้อม ซึ่งมีอุณหภูมิปกติเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส และเพิ่มสูงขึ้นเป็น  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส เมื่อเดินระบบเป็นเวลานานกว่า 6 ชั่วโมง เป็นความร้อนที่เกิดจากการทำงานเป็นเวลานานของเครื่องสูบน้ำ ดังนั้นการที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อัตราเร็วของการดูดซับสูงขึ้นด้วยเนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับแปรผันตามอุณหภูมิไม่ว่าการดูดซับนั้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน อีกทั้งจากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าถ่านกัมมันต์มีขนาดลดลงตามเวลา ซึ่งขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ลดลงส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสีย้อมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับระหว่างในห้องปฏิบัติการและในระบบไฮโดรไลโคลนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 135 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร

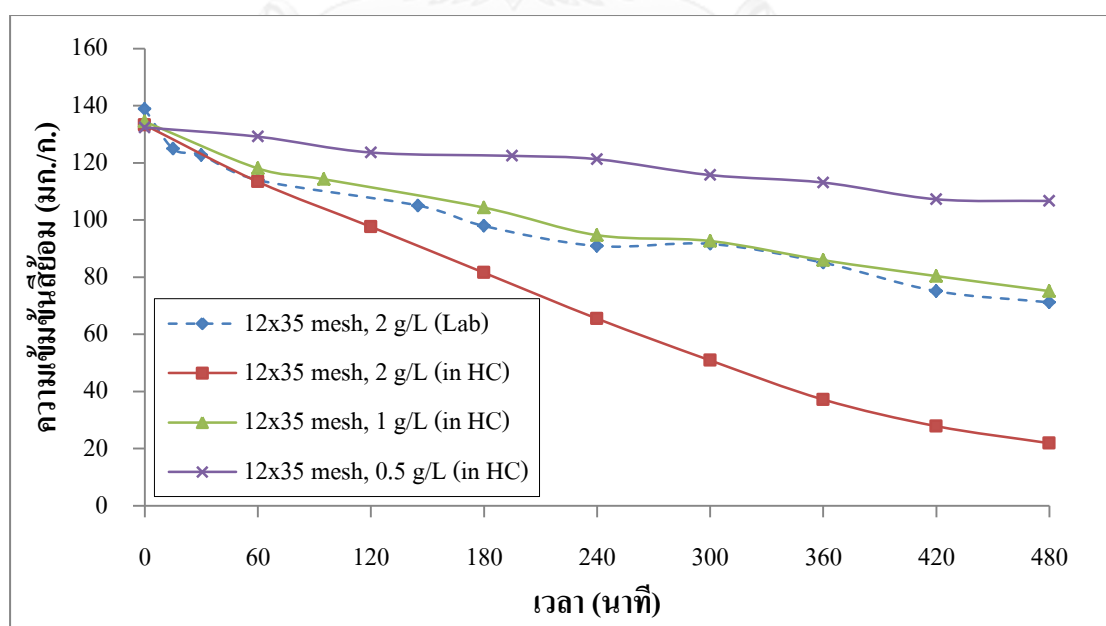
ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาอันดับสอง

	$q_e$ (มก./ก.)	$k_2$ (ก./มก.-นาที)	$k_2q_e^2$ (มก./ก.-นาที)	$R^2$
ห้องปฏิบัติการ	71.94	$5 \times 10^{-6}$	0.1075	0.9142
ระบบไฮโดรไลโคลน	192.31	$2.1 \times 10^{-5}$	0.1702	0.9398



เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลทางจลนศาสตร์ของปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่แตกต่างกันผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16 และเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางจลนศาสตร์ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับส่งผลให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถลดปริมาณสีย้อมได้ดี ปัจจัยที่ทำให้การดูดซับในระบบไฮโดรไซโคลนต่างจากห้องปฏิบัติการมีดังนี้

- (1) อุณหภูมิ: การดูดซับในห้องปฏิบัติการจะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส ในขณะที่การดูดซับในระบบไฮโดรไซโคลนจะเป็นไปตามสภาวะแวดล้อม ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ที่  $32 \pm 2$  องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นเกิดจากความร้อนที่ได้รับจากแสงแดดและอีกทางหนึ่งคือจากการเดินระบบเครื่องสูบน้ำเป็นเวลานาน การที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจเป็นผลให้การเคลื่อนที่และการแพร่ของของโมเลกุลสีย้อมไปยังโครงสร้างของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้ดี (Cardoso และคณะ, 2011) หรืออาจเกิดจากการสร้างพื้นที่การดูดซับขึ้นใหม่ (Al-Degs และคณะ, 2007)
- (2) การแตกของตัวดูดซับ: เนื่องจากการดูดซับสีย้อมเป็นการดูดติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ การแตกของถ่านกัมมันต์เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งอาจทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้ ดังผลการทดลองในหัวข้อการเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับเมื่อขนาดของถ่านกัมมันต์แตกต่างกัน โดยผลการทดลองให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกันคือความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด  $30 \times 35$  เมช มีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่า  $12 \times 14$  เมช เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์เท่ากัน



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับในระบบไฮโดรไซโคลนและในห้องปฏิบัติการ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 135 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาภายในการดูดซับในระบบไฮบริด

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	ปฏิกิริยา						
	อันดับหนึ่งเสมือน		อันดับสองเสมือน			ภายในอนุภาค	
	$R^2$	$k_1$	$R^2$	$k_2$	$k_2 q_e^2$	$R^2$	$k_p$
2	0.9866	0.0019	0.9398	$4.6 \times 10^{-6}$	0.1703	0.8874	2.3488
1	0.9918	0.0006	0.9373	$2.71 \times 10^{-5}$	0.2713	0.9584	2.5282
0.5	0.9622	0.0003	0.2425	$2.19 \times 10^{-6}$	0.1368	0.8109	2.0939

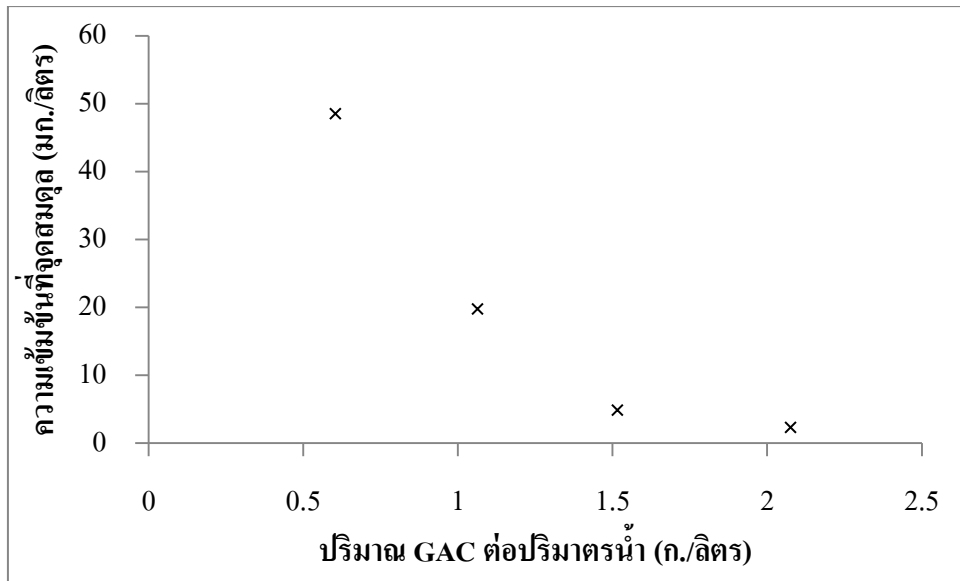
#### 4.3.2 สมการทำนายการดูดซับสีย้อมในระบบไฮบริด

จากผลทางจลนศาสตร์การดูดซับในระบบไฮบริดที่ได้สังเกตได้ว่าการลดลงของค่าความเข้มข้นสีย้อมที่เวลาต่างๆ มีลักษณะการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential decay) และจะลดไปจนถึงค่าต่ำสุดค่าหนึ่งหรือคือค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล ( $C_e$ ) ซึ่งสามารถสร้างเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

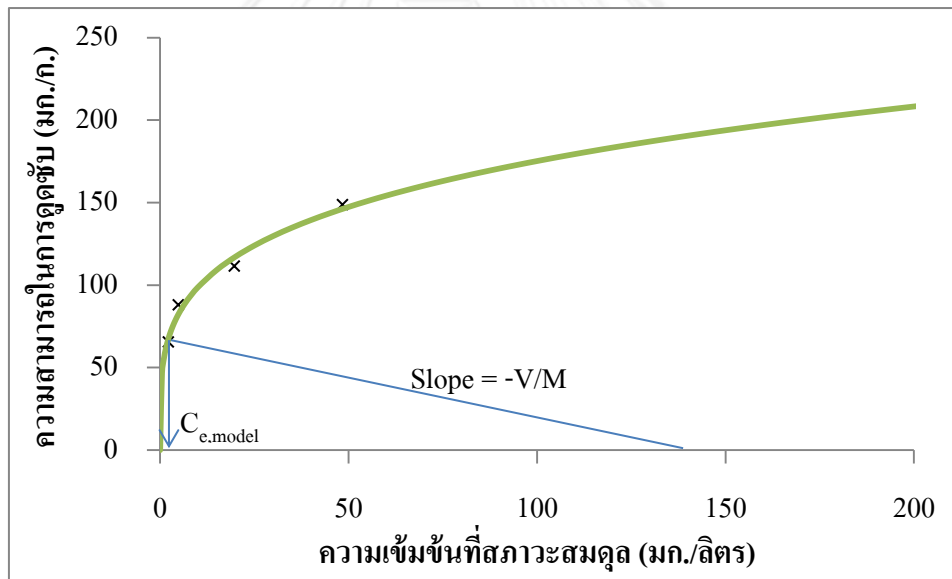
$$C_t = C_e + C_0 \exp(-kt) \quad (4.13)$$

โดยที่	$C_0$	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$C_t$	คือ ความเข้มข้นสีย้อมที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$C_e$	คือ ความเข้มข้นสีย้อมที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$k$	คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาที่ <sup>-1</sup> )
	$t$	คือ เวลาใดๆ (นาที่)

สิ่งที่ต้องการในสมการทำนายนี้คือสามารถบอกค่าความเข้มข้นสีย้อมที่คงเหลือ ณ เวลาใดๆ ( $C_t$ ) เพียงใส่ความเข้มข้นเริ่มต้นและเวลาที่ต้องการทราบค่า ซึ่งค่าคงที่  $k$  สามารถหาได้จากค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนจากการทดลองก่อนหน้านี้ แต่เนื่องจากมีความยากในการหาค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล ( $C_e$ ) และไอโซเทอมของการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีหาค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุลโดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุลของแต่ละปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรน้ำ (กรัมถ่านกัมมันต์ต่อลิตร) ใช้ข้อมูลการดูดซับที่เวลา 7 วัน นำผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับได้ดังรูปที่ 4.17 แล้วนำข้อมูลค่าความเข้มข้นสีย้อมที่จุดสมดุลและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์มาหาค่าคงที่ของไอโซเทอม โดยนำไอโซเทอมของฟรอนดลิชมาอธิบายการดูดซับนี้ตามที่ได้เลือกจากผลการทดลองการดูดซับก่อนหน้านี้ กราฟไอโซเทอมของฟรอนดลิชที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งในตอนนี้อยู่เพียงตัวแปรค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ยังไม่ทราบค่า



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.18 ฟรอนตลิชไอโซเทอมที่ใช้หาค่าความเข้มข้นสีย้อมที่สภาวะสมดุลสำหรับสมการทำนายผลของการดูดซับ ( $C_{e,model}$ )

โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) สามารถหาได้จากการใช้แบบจำลองทางจลนศาสตร์ซึ่งในการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เป็นรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน โดยเมื่อรู้ค่า  $C_e$  ที่หาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับและสมการสมดุลทางมวล (mass balance equation) ในสมการที่ (4.14) และ (4.15) และสามารถหา  $C_{e,model}$  ได้จากสมการที่ (4.16) โดยการใช้การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยเครื่องมือ Solver ใน MS Excel โดยใส่ค่าคงที่ดังนี้ ค่าความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น

( $C_0$ ) ส่วนกลับของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรน้ำเสียสีย้อม ( $V/M$ ) และค่าคงที่ของไอโซเทอม ฟรอนดลิช ( $K$  และ  $1/n$ )

$$q_e = KC_e^{1/n} \quad (4.14)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (4.15)$$

$$\frac{(C_0 - C_e)V}{m} = KC_e^{1/n} \quad (4.16)$$

เมื่อได้ค่า  $C_e$  แล้ว ต่อไปเป็นการหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) โดยนำค่า  $C_e$  ที่หาได้ แทนค่าลงในสมการเชิงเส้นตรงของสมการที่ (4.13) ได้สมการในรูปเชิงเส้นตรงคือ

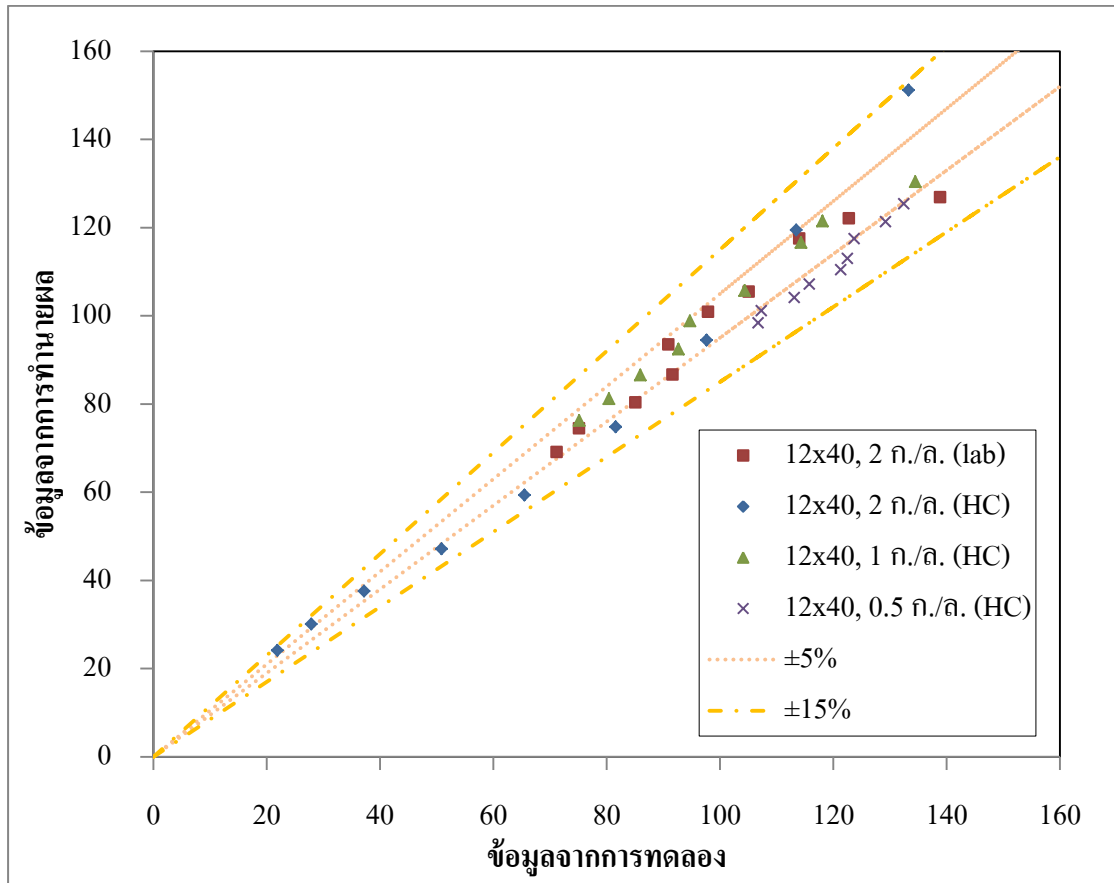
$$\ln(C_t - C_e) = \ln C_0 - kt \quad (4.17)$$

ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการทำนายผลกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12 ค่าจากสมการทำนายผลที่ได้พบว่าจากข้อมูลสะสมประมาณร้อยละ 90 มีค่าแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่เกินร้อยละ 15 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จึงเป็นความสัมพันธ์ที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังต้องการข้อมูลจากทดลองเพิ่มเติมเพื่อปรับแก้ให้มีความแม่นยำมากขึ้น เพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์แบบแบทช์ในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลอนซึ่งมี ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าการดูดซับในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความแม่นยำของสมการทำนายผลของแต่ละปริมาณถ่านกัมมันต์

ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	สมการทำนายผล		เปรียบเทียบสมการทำนายผลกับผลการทดลองจริง	
	$R^2$	$k$	$R^2$	ร้อยละของความผิดพลาด (ร้อยละ 90 ของจุดข้อมูลทั้งหมด)
2 กรัมต่อลิตร (lab)	0.9618	0.0013	0.9514	6%
2 กรัมต่อลิตร (HC)	0.9827	0.0040	0.9681	11%
1 กรัมต่อลิตร (HC)	0.9897	0.0014	0.9847	4%
0.5 กรัมต่อลิตร (HC)	0.9702	0.0009	0.9601	9%

การใช้งานสมการทำนายผลการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด ทำได้โดยกำหนดปริมาตร และความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมที่ต้องการบำบัด และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ เช่น ต้องการบำบัด น้ำเสียสีย้อมความเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำเสีย 250 ลิตร ใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 10 ชั่วโมง สามารถหาความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือที่เวลา 10 ชั่วโมง โดยอาศัยไอโซเทอมจากรูปที่ 4.18 เพื่อหาความเข้มข้นของสีย้อมที่จุดสมดุล โดยลากเส้น ความชันจากความเข้มข้นเริ่มต้นชนกับเส้นไอโซเทอมจากนั้นลากลงขนานกับแกน  $Y$  ได้ค่า  $C_{e,model}$  เท่ากับ 1.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ค่า  $k$  ที่ได้จากรูปที่ 4.12 คำนวณด้วยสมการที่ (4.17) ได้ ความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือที่เวลา 10 ชั่วโมง เท่ากับ 12.19 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทำนายผลกับข้อมูลจากการทดลอง

ในอีกทางหนึ่งสามารถใช้สมการทำนายผลเพื่อคำนวณหาเวลาในการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริดได้ เช่น หากต้องการบำบัดน้ำเสียสีย้อมความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 2 กรัมต่อลิตร ค่า  $k$  จากตารางที่ 4.12 และค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล  $C_{e,model}$  นำมาคำนวณด้วยสมการที่ (4.17) ได้เวลาในการดูดซับ 12 ชั่วโมง ในขณะที่เมื่อนำผลการทดลองในระบบไฮบริดที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การดูดซับในห้องปฏิบัติการการดูดซับให้ความเข้มข้นของสีย้อมเหลือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เท่ากัน ต้องใช้เวลาถึง 53 ชั่วโมง จากการทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนทำให้ประมาณเวลากักของสีย้อมได้ สำหรับการดูดซับสีย้อมนี้ด้วยถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อลิตรเวลากักที่ได้ประมาณ 10 ชั่วโมง คำนวณอัตราการไหลได้ 0.5 ลิตรต่อนาที เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลองต่อไปในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่อง

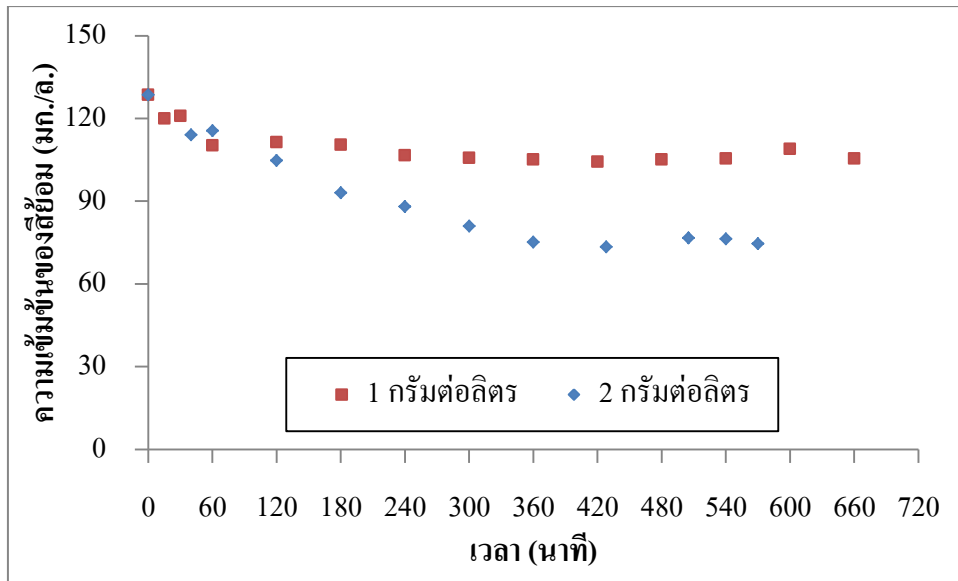
#### 4.4 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลน

##### 4.4.1 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลนแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous reactor)

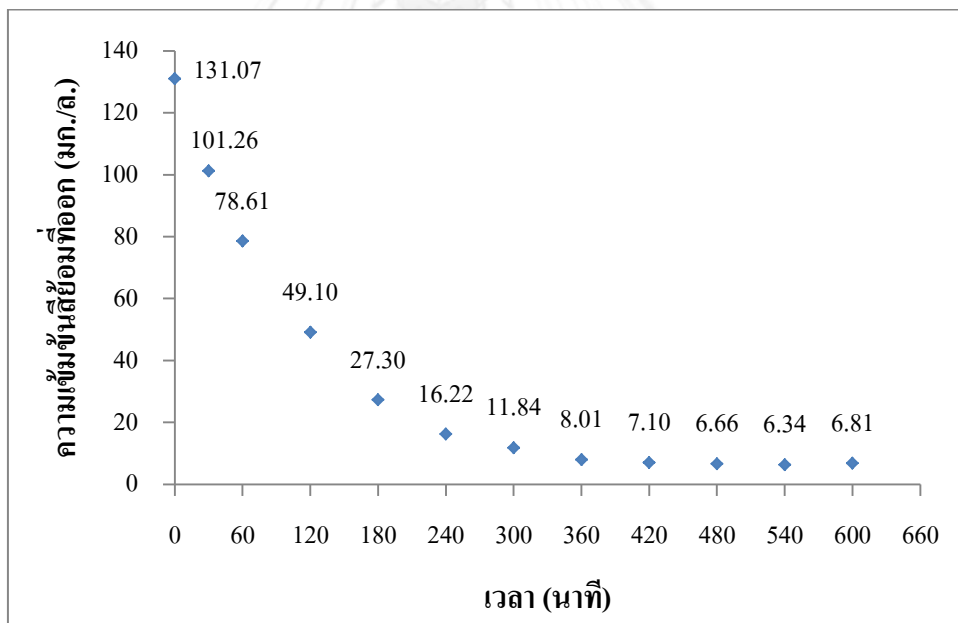
ในการทดลองการดูดซับแบบกึ่งต่อเนื่องใช้แนวคิดเช่นเดียวกับการดูดซับแบบคอลัมน์ (Column adsorption) โดยใส่ปริมาณตัวกลางดูดซับเริ่มต้นเพียงครั้งเดียว จากนั้นให้น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราไหลคงที่ค่าหนึ่ง ผลที่ได้คือ กราฟเบรกทรู (Breakthrough curve) ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด ( $C_t$ ) และระยะเวลาในการเดินระบบ ( $t$ ) โดยมีจุดที่มีความสำคัญบนกราฟเบรกทรูมี 2 จุด คือ (1) Break-point time ( $T_B$ ) คือ จุดเวลาบนกราฟเบรกทรูที่ความเข้มข้นขาออกของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่ากับความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ (2) Exhaustion time ( $T_E$ ) คือ จุดเวลาที่ตัวกลางดูดซับไม่สามารถดูดซับได้อีกต่อไป เมื่อรู้เวลา  $T_E$  จะทำให้สามารถประมาณค่าความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟเบรกทรู

เริ่มการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 135 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที และปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 570 นาที โดยเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือที่ทางออกส่วนบน ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.20 แต่จากผลการทดลองยังไม่เห็นแนวโน้มที่จะเกิดจุด  $T_E$  หรือจุดที่ถ่านกัมมันต์หมดความสามารถในการดูดซับ จึงทำการลดปริมาณถ่านกัมมันต์ลงเหลือ 1 กรัมต่อลิตร และเก็บผลการทดลองนานขึ้นเป็น 660 นาที แต่ยังไม่เกิดแนวโน้มที่ถ่านกัมมันต์จะหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยลดอัตราการไหลเป็น 0.5 ลิตรต่อนาที พร้อมทั้งเพิ่มปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเป็น 4 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ปริมาณนี้สามารถกำจัดสีย้อมจนเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ในเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.21 ผลการทดลองที่ได้ยังคงไม่ปรากฏจุดเวลาที่ถ่านกัมมันต์หมดความสามารถในการดูดซับสีย้อมอย่างชัดเจน จึงยังไม่พบจุดเวลาที่จะนำไปใช้เป็นเวลาถ่านกัมมันต์ได้

เมื่อพิจารณากราฟเบรกทรูของถ่านกัมมันต์ทั้งสองปริมาณในรูปที่ 4.20 ความเข้มข้นที่ออกในช่วงแรกจะยังสูงอยู่เนื่องจากยังเป็นช่วงที่ความเข้มข้นสีย้อมในเฟสน้ำกับที่ผิวของถ่านกัมมันต์ยังแตกต่างกันมากอยู่และเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับยังไม่เพียงพอ อีกทั้งยังรวมถึงผลจากการแตกของถ่านกัมมันต์ ซึ่งส่งผลให้ในช่วงนี้ความเข้มข้นจึงลดลงได้เรื่อยๆ จนเข้าสู่ช่วงเวลาที่ความเข้มข้นที่ออกคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีเวลาสัมผัสกันอย่างเพียงพอและเป็นช่วงที่ตัวดูดซับสามารถกำจัดสีย้อมที่เข้าได้ทั้งหมดแต่ไม่สามารถลดความเข้มข้นสีย้อมในถังให้ต่ำลงได้อีก อย่างไรก็ตามถ้าให้เวลาเดินระบบมากขึ้นจะพบจุดที่ความเข้มข้นขาออกเพิ่มสูงขึ้นจนเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถดูดซับได้อีกต่อไป และผลจากการลดปริมาณถ่านกัมมันต์ลงจาก 2 กรัมต่อลิตร เหลือ 1 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่ผ่านระบบไฮบริดเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง



รูปที่ 4.20 กราฟเบรททูล์ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 130 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 1 และ 2 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.21 กราฟเบรททูล์ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 130 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองการดูดซับในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่องนี้ แม้ว่าจะไม่ทราบเวลาที่ถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพในการกำจัดสีอย่างชัดเจน แต่จากการทดลองทำให้ทราบค่าอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้กำจัดสีอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับ

บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและอัตราการไหลนี้คือ 4 กรัมต่อลิตร และเพื่อเป็นแนวทางในการทดลองการดูดซับในระบบไฮบริดแบบต่อเนื่อง จากรูปที่ 4.21 ได้ทดลองเลือกที่จุดเวลา 8 ชั่วโมง เป็นเวลากักกักกักกักกักกัก (SRT) ซึ่งเป็นจุดที่ความเข้มข้นของน้ำเสียดูดซับที่ออกเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยลง ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงการดูดซับในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่อง

อัตราไหลของน้ำเสีย (ลิตร/นาท)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ
1	1	106.9	110.37
	2	74.5	82.86
0.5	4	6.3	60.38

จากการทดลองที่ได้นำมาสร้างสมการทำนายผลเพื่อหาค่าความเข้มข้นสุดท้ายที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลและขนาดของถังปฏิกรณ์ โดยใช้สมการทำนายผล

$$C_t = C_e + C_0 \exp(-kt) \quad (4.18)$$

- โดยที่  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_t$  คือ ความเข้มข้นสีย้อมที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาท<sup>-1</sup>)  
 $t$  คือ เวลาใดๆ (นาท)

ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้สมการทำนายผล

ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าคงที่ k (นาท <sup>-1</sup> )
1	106.9	0.01179
2	74.5	0.01704
4	6.3	0.14124

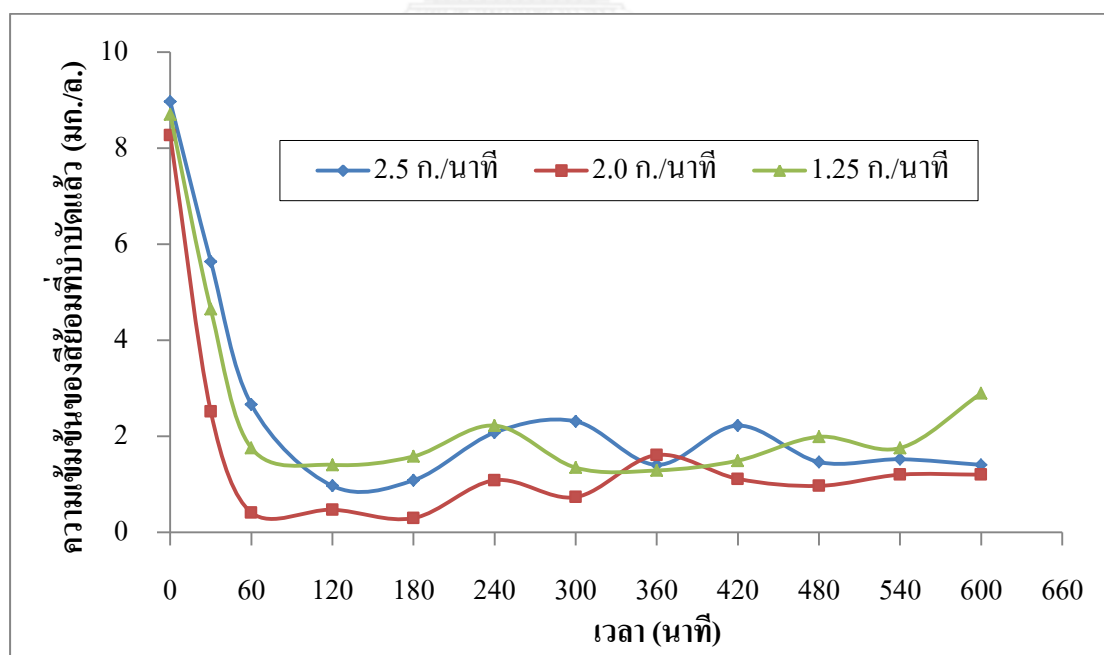
จากผลการทดลองการดูดซับในระบบไฮบริดแบบกึ่งต่อเนื่องนี้ สามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงขึ้นเมื่อเพิ่มตัวกลางดูดซับ และ/หรือลดอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ และเนื่องจากการทดลองนี้ไม่พบจุดเวลาที่ถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพอย่างชัดเจน ดังนั้นในการทดลองในระบบไฮบริดแบบต่อเนื่อง จะทดลองโดยปรับอัตราการไหลของถ่านกัมมันต์ที่อ้างอิงกับการดูดซับสีย้อมที่สภาวะเดินระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมคือที่อัตราการไหลของสีย้อม 0.5 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสีย้อม 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 4 กรัมต่อลิตร และเลือกเวลากักกักกักกักกักน้อยที่สุดคือ 8 ชั่วโมง



#### 4.4.2 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor)

ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาใช้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ทำการทดลองโดยใส่ปริมาณถ่านกัมมันต์เริ่มต้น 1,200 กรัม ลงในถังกวนผสมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำเสียสีย้อม 300 ลิตร และให้อัตราการไหลเข้าออกของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที ที่มีความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร นำถ่านกัมมันต์เติมเข้าและนำออกทุก 30 นาที ด้วยปริมาณอัตราการไหลของถ่านกัมมันต์ 0.42 0.83 1.25 2.0 และ 2.5 กรัมต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวัดความเข้มข้นสีย้อมที่เหลืออยู่ (C<sub>t</sub>) ที่ทางออกส่วนบนตามเวลา ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

จากการทดลองรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า อัตราการไหลของถ่านกัมมันต์ 2.5 และ 2 กรัมต่อนาที สามารถทำให้ความเข้มข้นสีย้อมที่ออกลดลงต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ผลการทดลองที่อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ 1.25 กรัมต่อนาที ความเข้มข้นของสีย้อมที่ออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อีกทั้งจากการเปรียบเทียบผลจากการเพิ่มอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับจากตารางที่ 4.15 พบว่า อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับที่เพิ่มขึ้นสามารถกำจัดสีย้อมได้ดีขึ้น และจากผลการทดลองให้ผลว่าการบำบัดสีย้อมให้ความเข้มข้นของสีย้อมลดลงต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียสีย้อม 0.5 ลิตรต่อนาที ต้องการอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับที่มากกว่า 2.0 กรัมต่อนาที ดังนั้นระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่เดินระบบแบบถ่วงต่อเนื่องสามารถนำไปใช้ในการกำจัดน้ำเสียสีย้อมได้



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นสีย้อมคงเหลือที่ผ่านระบบไฮบริด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ 2.5 2.0 และ 1.25 กรัมต่อนาที



150 มก./ล.

5.5 มก./ล.

&lt;2 มก./ล.

รูปที่ 4.23 น้ำเสียสีขุ่นที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบไฮบริด  
ที่  $Q=0.5$  ล./นาที  $L_s=2.5$  ก./นาที ความเข้มข้นสีขุ่น 150 มก./ล.

จากผลการทดลองการปรับอัตราการไหลของตัวดูดซับสามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ ) ได้โดยใช้สมการที่ (4.19) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.15

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times Q}{L_s} \quad (4.19)$$

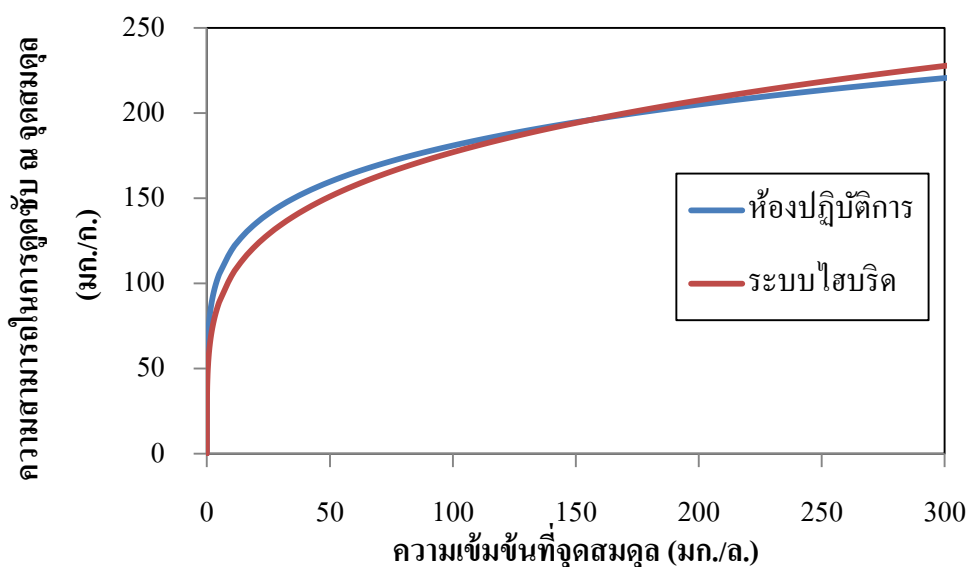
โดย  $Q$  คือ อัตราการไหลของเฟสที่ต้องการบำบัด (ล./นาที)

$L_s$  คือ อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับ (ก./นาที)ม

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_o$ ) (มก./ล.)	อัตราการไหลของตัวดูดซับ ( $L_s$ ) (ก./นาที)	ความเข้มข้น ณ สมดุล ( $C_e$ ) (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ ) (มก./ก.)
150	2.5	1.40	29.72
	2.0	1.20	37.20
	1.25	2.89	58.84
	0.83	1.78	88.93
	0.42	1.84	177.79

จากรูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอมการดูดซับในห้องปฏิบัติการและการเดินระบบไฮบริดแบบต่อเนื่อง ความสามารถในการดูดซับในระบบไฮบริดมีค่าน้อยกว่าการดูดซับในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่าคงที่ไอโซเทอมของฟรุนดลิช คือค่า  $K$  และ  $1/n$  พบว่า ค่า  $K$  ในระบบไฮบริดมีค่า 52.15 ลิตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $K$  ที่ได้จากการดูดซับในห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่า 78.85 ลิตรต่อกรัม กล่าวคือที่ปริมาณตัวกลางดูดซับเท่ากันการดูดซับในห้องปฏิบัติการมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่า เนื่องจากการดูดซับในห้องปฏิบัติการตัวกลางดูดซับมีเวลาในการดูดซับอย่างเพียงพอ ในขณะที่การดูดซับในระบบไฮบริดตัวกลางดูดซับมีการเติมเข้าและนำออกตลอดเวลาจึงไม่สามารถดูดซับได้เต็มประสิทธิภาพ ในอีกทางหนึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่า  $1/n$  พบว่าค่า  $1/n$  ในระบบไฮบริดมีค่าเท่ากับ 0.278 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $1/n$  ของการดูดซับในห้องปฏิบัติการที่มีค่าเท่ากับ 0.180 โดยที่ค่า  $1/n$  นี้เป็นค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ ค่าความชันมากจะเกิดการดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจากที่ได้วิจารณ์ผลในการทดลองการดูดซับในห้องปฏิบัติการ (ผลการทดลองที่ 4.1) เส้นไอโซเทอมที่มีความชันหรือค่า  $1/n$  มาก จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับในระบบต่อเนื่อง (Continuous Treatment) (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545) ปัจจัยที่ส่งผลให้การดูดซับในระบบไฮบริดแตกต่างจากการดูดซับในห้องปฏิบัติการ เป็นผลจากการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ ที่ส่งผลให้อัตราการดูดซับในระบบไฮบริดมีค่าสูงกว่าการดูดซับในห้องปฏิบัติการ ดังที่วิจารณ์ผลในการทดลองการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด (ผลการทดลองที่ 4.3) การดูดซับในระบบไฮบริดจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับในระบบไฮบริดจะน้อยกว่าในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามโดยรวมแล้วกราฟทั้งสองมีทิศทางในทางเดียวกัน เป็นการยืนยันว่าระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีออกจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม



รูปที่ 4.24 เส้นสมมูลของระบบไฮบริดในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับด้วยวิธีทางกราฟ

### การนำผลการทดลองประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบไฮบริดเบื้องต้น

ค่าพารามิเตอร์ที่ในสำหรับการออกแบบระบบไฮบริดสามารถประมาณได้จากการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method) ซึ่งจากสมการสมดุลมวล (Mass balance) ของระบบไฮบริดแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง คือ

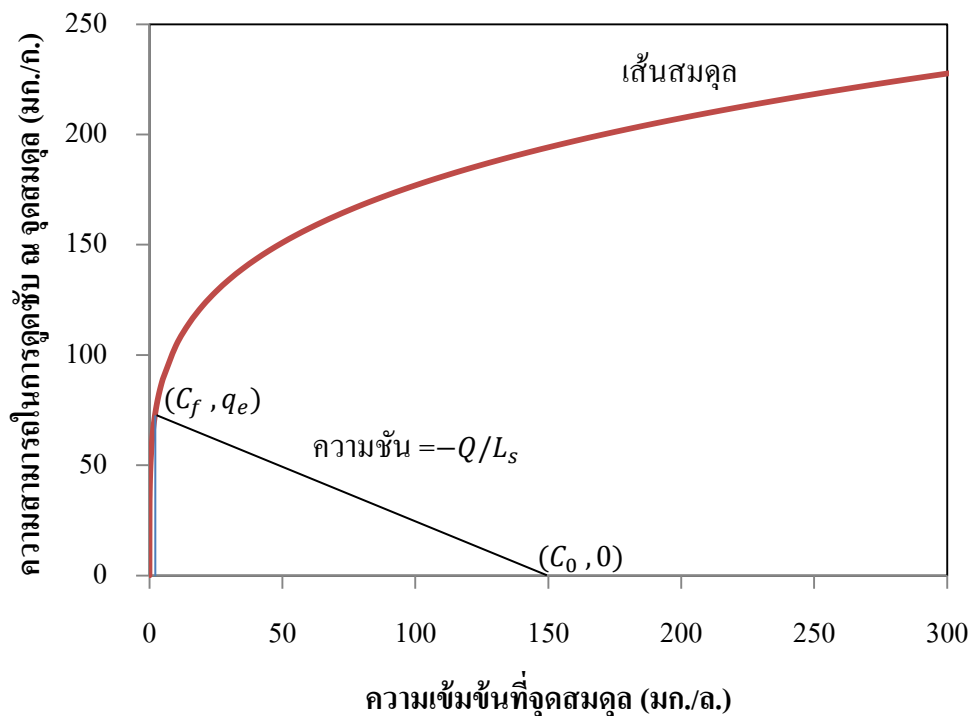
$$L_s(q_e - q_1) = Q(C_0 - C_f) \quad (4.20)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{Q}{L_s} = \frac{(q_e - q_1)}{(C_0 - C_f)} \quad (4.21)$$

### แนวทางการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method)

- นำข้อมูลจากการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e$  (แกน X) และ  $q_e$  (แกน Y) ดังรูปที่ 4.25 เส้นกราฟที่ได้ เรียกว่า เส้นสมดุลของระบบ (Equilibrium line)
- กำหนดความเข้มข้นสุดท้ายที่ออกจากระบบบำบัด ( $C_f$ ) บนแกน X และลากเส้นตรงจากจุดดังกล่าวขนานแกน Y ขึ้นไปชนกับเส้นสมดุลของระบบ อ่านค่า  $q_e$  ได้จากแกน Y
- เนื่องจากต้องการให้ระบบเกิดประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด จึงกำหนดให้  $q_1$  เท่ากับ 0 เพราะค่า  $q_1$  คือ ความสามารถในการดูดซับของสารตัวกลาง ณ จุดที่ออกจากระบบ
- กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ( $C_0$ ) บนแกน X
- ลากเส้นความชันที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ( $C_f, q_e$ ) และ 4 ( $C_0, q_1$ ) จะพบว่าความชันคือค่า  $Q/L_s$  ดังสมการที่ (4.21)
- เมื่อทราบอัตราการไหลของน้ำเสีย  $Q$  ลิตรต่อชั่วโมง จะประมาณปริมาณอัตราการไหลของถ่านกัมมันต์ได้ ( $L_s$ )



รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์กระบวนการดูดซับโดยวิธีทางกราฟ (Graphical method)

ตัวอย่างการคำนวณเช่นให้น้ำเสียสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องการบำบัดให้เหลือความเข้มข้นของสีย้อมเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราไหลของน้ำเสียเท่ากับ 1 ลิตรต่อ นาที จะต้องใช้อัตราการไหลของตัวกลางดูดซับเท่าไร

จากกราฟรูปที่ 4.25 ที่  $C_f$  เท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ค่า  $q_e$  เท่ากับ 72.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความชัน  $Q/L_s$  เท่ากับ 0.736 ลิตรต่อกรัม และเมื่อต้องการให้อัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 1 ลิตรต่อ นาที อัตราการไหลของตัวดูดซับที่ต้องการเท่ากับ 1.35 กรัมต่อ นาที จะเห็นว่าประโยชน์ของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง คือ การคำนวณและออกแบบระบบสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method) ซึ่งมีความสะดวกต่อการคำนวณและออกแบบ เมื่อสถานะในการเดินระบบเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความเข้มข้นและ/หรืออัตราการไหลของน้ำเสียสีย้อม สามารถที่จะประมาณอัตราการไหลของตัวกลางดูดซับได้จากกราฟสมดุลของระบบ

#### ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบด้วยระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลน

ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดกากตะกอนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระบวนการดูดซับแล้ว โดยที่ราคาของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 ของบริษัท Calgon carbon corporation ราคา 192 บาทต่อกิโลกรัม และค่ากำจัดกากตะกอน จากบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) (GENCO) อยู่ที่อัตรา 3,000 บาทต่อตัน หรือ 3 บาทต่อ

กิโลกรัม อีกทั้งยังรวมถึงค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าในระบบไฮบริดไฮโดรโซโคลน อัน ได้แก่ เครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ และใบพัดกวนผสมน้ำชนิด Rushton turbine ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ซึ่งมีค่าการใช้ไฟฟ้าประมาณ 2.50 ถึง 4.00 บาทต่อหน่วย

สมมติปริมาณน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอมีอัตราการไหลของน้ำเสียสีย้อม 0.5 ลิตรต่อนาที โดยมีความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องการบำบัดสีย้อมจนเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร คำนวณหาปริมาณการใช้สารดูดซับ จากอัตราการไหลของถ่านกัมมันต์ 2.0 ลิตรต่อนาที ค่ากระแสไฟฟ้า 3 บาทต่อหน่วย ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีย้อมในหนึ่งชั่วโมงแสดงดังตารางที่ 4.16 ได้ค่าใช้จ่ายรวมในการใช้ถ่านกัมมันต์ 195 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็น 23.4 บาทต่อชั่วโมง และค่าใช้ไฟฟ้าคิดเป็น 19.8 บาทต่อชั่วโมง รวมค่าใช้จ่ายในทั้งสิ้น 43.2 บาท/ชั่วโมง หรือ 1.44 บาทต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้บางส่วนจากการเลือกขนาดเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรโซโคลน

ตารางที่ 4.16 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีย้อมความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลน้ำเสีย 30 ลิตรต่อชั่วโมง

ประเภทของค่าใช้จ่าย	ราคาต่อหน่วย	ปริมาณ	รวม (บาท/ชั่วโมง)
<u>ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด</u> จัดซื้อ	192	0.120	23.04
กำจัดกากตะกอน	3	(กิโลกรัม/ชั่วโมง)	0.36
<b>รวม</b>	195 (บาท/กิโลกรัม)	0.120 (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	<u>23.4</u>
<u>ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า</u> เครื่องสูบน้ำ	3	5.5 กิโลวัตต์	<u>19.8</u>
ใบพัดกวนผสม	(บาท/กิโลวัตต์)	1.1 กิโลวัตต์	
		<b>รวมทั้งสิ้น</b>	<u>43.2</u> (บาท/ชม.) <u>1.4</u> (บาท/ลิตร)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อม (สีรีแอกทีฟโทนสีดำ) ออกจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมในยามฉุกเฉิน โดยพิจารณาประสิทธิภาพของระบบทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ และประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้ว ออกจากน้ำด้วยไฮโดรไซโคลน

##### 5.1.1 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

- สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีกับถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนอยู่ในช่วงขนาดกลาง (Mesopore)
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายและความเข้มข้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ส่งผลให้เกิดแรงผลักดัน (Driving force) จากสารละลายไปยังผิวของตัวดูดซับ
- การใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มตัวกลางดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและบริเวณของการดูดซับ
- ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กจะมีผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของตัวดูดซับที่เท่ากัน ขนาดของตัวดูดซับที่เล็กจะมีพื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดในการวิจัยนี้ คือ 30x35 เมช (0.5-0.6 มิลลิเมตร)
- จลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 คือ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน และพรุนดลิสไอโซเทอม และในการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 คือ ปฏิกริยาอันดับสองเสมือน และพรุนดลิสไอโซเทอม

##### 5.1.2 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดของ

###### ไฮโดรไซโคลน

- ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนส่งผลต่อแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับอนุภาค ความดันจ่ายเข้าที่สูงขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการแยกเพิ่มขึ้น แต่ความดันจ่ายเข้าที่มากเกินไปเป็นผลเสียต่อการแยกอนุภาค เนื่องจากเกิดแรงเฉือน และความปั่นป่วนที่มากเกินไปภายในไฮโดรไซโคลน ส่งผลให้อนุภาคแตกและมีขนาดเล็กลง ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนจึงลดลง สำหรับงานวิจัยนี้ความดันจ่ายเข้าที่เหมาะสมคือ 1 บาร์
- อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง แต่จากผลการทดลองให้ผลในทางตรงกันข้าม นั่นคือ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการแยกของถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30x35 เมช ให้ผลที่ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่กว่า กล่าวคือไฮโดรไซโคลนขนาด 50

มิลลิเมตร มีความสามารถในการแยกถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 30x35 เมช ได้ ในขณะที่ผลการคำนวณประสิทธิภาพให้ผลตรงกันข้ามกับทางทฤษฎี สาเหตุเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะชนใบพัดของเครื่องสูบน้ำได้น้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อีกทั้งการที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ทำให้มีพื้นที่ในการรับแรงกระทำมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคขนาดใหญ่จึงมีโอกาสแตกมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

- การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลนส่งผลให้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ออกทางท่อทางออกส่วนล่างมีความเข้มข้นมากขึ้น น้ำใสออกทางท่อทางออกส่วนบนมากขึ้น แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกส่วนล่างที่เล็กเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนลดลง เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกส่วนล่างที่เล็กเกินไปจะทำให้อนุภาคเกิดการสะสมที่บริเวณทางออกส่วนล่าง จนเกิดการอุดตันและมีโอกาสที่อนุภาคบางส่วนปะปนไปกับเส้นทางการไหลของน้ำใสได้ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกส่วนล่างที่ให้ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดได้ดีสำหรับงานวิจัยนี้ คือขนาด 9 มิลลิเมตร

- การใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะส่งผลให้ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กได้มากขึ้น ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นสามารถรองรับไหลได้มากขึ้น จากผลการวิจัยนี้พบว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาด 12x40 เมช ได้ไม่ถึงร้อยละ 100 ดังนั้น การเพิ่มขนาดของไฮโดรไซโคลนเป็น 75 มิลลิเมตร จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงกว่าเดิม

### 5.1.3 ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในการกำจัดสีเยื่อ

- อัตราเร็วในการดูดซับสีเยื่อของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด Filtrasorb 200 ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฮบริดมีค่ามากกว่าในห้องปฏิบัติการ เป็นผลจากอุณหภูมิภายในระบบไฮบริดสูงกว่าในห้องปฏิบัติการซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราในการดูดซับสูงขึ้น อีกทั้งเป็นผลจากการแตกของถ่านกัมมันต์ระหว่างการเดินระบบภายในระบบไฮบริด ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวหรือบริเวณของการดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจึงเกิดได้ดีขึ้น

- ความสามารถในการดูดซับสีเยื่อของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฮบริดมีค่าสูงกว่าในห้องปฏิบัติการ เป็นผลจากปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและการแตกของอนุภาค

- มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous operating) สำหรับการกำจัดสีเยื่อ โดยพบว่าที่ อัตราการไหลของน้ำเสียสีเยื่อ 0.5 ลิตรต่อนาที ที่มีความเข้มข้นของสีเยื่อ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องการอัตราการไหลของถ่านกัมมันต์มากกว่า 2.0 กรัมต่อนาที จึงจะกำจัดสีเยื่อให้มีความเข้มข้นคงเหลือต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

- การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีเยื่อทำได้โดยการเพิ่มอัตราการไหลของถ่านกัมมันต์และ/หรือลดอัตราการไหลของน้ำเสียสีเยื่อ ในขณะที่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์หลังจากผ่านการดูดซับแล้ว พบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x40 เมช ไม่ถึงร้อยละ 100 ซึ่งที่ความดันจ่าย



เข้า 1 บาร์ มีประสิทธิภาพในการแยกอยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 ประสิทธิภาพที่ลดลงเป็นผลจากการแตกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ภายในไฮโดรไซโคลน

- ข้อมูลในการเดินระบบไฮบริด ได้แก่ ปริมาณน้ำในถังถังกวนผสม 300 ลิตร ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน 1 บาร์ (0.78 ลิตรต่อวินาที) และอัตราการน้ำเสียไหลเข้าและออก 0.5 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

จากการที่ประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ของไฮโดรไซโคลนลดลงเนื่องจากการแตกของถ่านกัมมันต์ การเลือกใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกลง และ/หรือเลือกใช้ตัวกลางดูดซับขนาดเล็กที่มีความเป็นโพรงน้อย อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกให้สูงขึ้น และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบไฮบริดสามารถลดได้ด้วยการเลือกขนาดเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรรณิการ์ สิริสิงห. 2544. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- กฤษณ์ พลรัตน์. 2547. การจัดกำมะถันจากมิตเดิลดีสทิลเลตโดยการดูดซับบนโพแทสเซียมไอโอ-ไดด์/ถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุทัศน์ มิลินทเลข. 2537. การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นภาพร พานิช และคณะ. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นริชฎา กวีนันทวงศ์. 2542. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการ PAC-UF. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรางศิริ ศรีศุภพัชร. 2551. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์ และสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสไลด์ที่ค่อยสลายแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันตุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมการประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัชนิย์ รุกขชาติ. 2546. สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง [online]. กรุงเทพมหานคร: กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ. แหล่งที่มา: [http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday\\_data/biology.htm](http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm) [26 พฤศจิกายน 2555]

- ลักษิกา กองวิเชียร. 2556. การพัฒนากระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อใช้ในการบำบัดสีในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรศิริ เสียงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน, โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, สมาคม. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- สนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์. 2552. การประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท เพื่อใช้ในการกำจัดกรวดทรายในโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. สถาบันสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. 2545. คู่มือตรวจประเมินเทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรุงเทพมหานคร.
- เสกสรร เขียวธัญญกิจ. 2546. การกำจัดสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ไม้ยูคาลิปตัสและแอนทราไซต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อิสริยาภรณ์ บุญยืน. 2552. การดูดซับลิควินและแทนนินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนจากกระบวนการเอเอสแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร.

## ภาษาอังกฤษ

- Al-Degs, Y.S., El-Barghouthi, M.I., El-Sheikh, A.H. and Walker, G.M. 2008. Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. Dyes and Pigments 77: 16-23.
- Bradley, D. 1965. The Hydrocyclone. New York: Pergamon Press Ltd.
- Cardoso, N.F., Pinto, R.B., Lima, E.C., and Calvete, T. 2011. Removal of remazol black B textile dye from aqueous solution by adsorption. Desalination. 269: 92-103.

- 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.
- Gulnaz, O., Kaya, A., and Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. Journal of Hazardous Materials. 134: 190-196.
- Hai, F.I., Yamamoto, K. and Fukushi, K. 2007. Hybrid treatment systems for dye wastewater. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 37: 315-377.
- Husveg, T., Rambeau, O., Drengstig, T. and Bilstad, T. 2007. Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates. Minerals Engineering. 20: 368–379.
- Ip, A.W.M., Barford, J.P. and McKay, G. 2009. Reactive Black dye adsorption/desorption onto different adsorbents: Effect of salt, surface chemistry, pore size and surface area. Journal of Colloid and Interface Science. 337: 32-38.
- 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.
- Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Papic, S., Koprivanac, N., Bozic, A.L., Metes, A. 2004. Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater by combined Al(III) coagulation/carbon adsorption process. Dyes Pigment 62: 291-298.
- 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.
- Punyapalukul, P. 2004. Removal of alkylphenol polyethoxylates using hexagonal mesoporous silicate. Doctoral dissertation. Department of Engineering Graduate School The University of Tokyo.
- Puprasert, C., Hebrard, G., Lopez, L., Aurelle, Y. 2004. Potential of using Hydrocyclone and Hydrocyclone equipped with Grit pot as a pre-treatment in run-off water treatment. Chemical Engineering and Processing 43: 67-83.

- Redlich, O. and Peterson, D. 1959. A Useful Adsorption Isotherm. The Journal of Physical Chemistry. 63: 1024.
- Saengchan, K., Nopharatana, A. and Songkasiri, W. 2009. Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop on tapioca starch separation with a hydrocyclone. Chemical Engineering and Processing 48: 195–202.
- 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.
- Svarovsky, L. 1984. Hydrocyclone. Pennsylvania: Rinehart and Winston Ltd. 30-43.
- Svarovsky, L. 2000. Solid-Liquid Separation. 4<sup>th</sup> ed. England: Butterworth-Heinemann.
- Valencia, G., and Gloyna, E.F. 1972. On the synthesis of activated carbon column design data. Technical report EHE-72-11 CRWR 90. Civil engineering department The University of Texas at Austin.
- Yang, X. and Al-Duri, B. 2005. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon. Journal of Colloid and Interface Science 287: 25–34.



ภาคผนวก

ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ข้อมูลวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจลนศาสตร์ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์แตกต่างกัน

เวลา (นาท.)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)					
	2 กรัม/ลิตร		4 กรัม/ลิตร		10 กรัม/ลิตร	
	GAC (กรัม)	$C_t$ (มก./ล.)	GAC (กรัม)	$C_t$ (มก./ล.)	GAC (กรัม)	$C_t$ (มก./ล.)
0		132.53		132.53		132.53
30	0.1061	118.50	0.2025	116.02	0.5052	93.08
60	0.1041	113.24	0.2024	105.94	0.5074	72.62
120	0.1080	109.74	0.2019	94.98	0.5077	54.94
180	0.1072	96.29	0.2026	87.82	0.504	40.62
240	0.1062	90.63	0.2028	80.51	0.5063	33.90
300	0.1082	83.73	0.2033	75.69	0.5062	27.18
360	0.1076	84.31	0.202	67.07	0.5079	23.53

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสี่ข้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 12x14 เมช

เวลา (นาท.)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0		144.3666	65.95	0.00			
30	0.1061	130.3390	65.95	6.61	1.79	4.54	5.48
60	0.1041	125.0787	65.95	9.26	1.77	6.48	7.75
120	0.1080	121.5718	65.95	10.55	1.76	11.37	10.95
185	0.1072	108.1288	65.95	16.90	1.71	10.95	13.60
314	0.1082	95.5625	65.95	22.55	1.66	13.92	17.72
360	0.1076	96.1470	65.95	22.41	1.66	16.07	18.97
420	0.1055	91.4711	65.95	25.07	1.63	16.75	20.49
480	0.1049	85.9186	65.95	27.86	1.60	17.23	21.91
540	0.1074	89.4254	65.95	25.58	1.63	21.11	23.24
3084	0.1065	19.5801	65.95	58.59	0.97	52.64	55.53
10080	0.1044	2.4840	65.95	67.95		148.34	100.40

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 16x18 เมช

เวลา (นาที)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	0	138.2295	64.46	0.00			
5	0.1037	134.7226	64.46	1.69	1.80	2.9570	2.24
30	0.1065	127.7089	64.46	4.94	1.77	6.0738	5.48
60	0.1062	121.8641	64.46	7.71	1.75	7.7871	7.75
120	0.1073	116.6038	64.46	10.08	1.74	11.9080	10.95
180	0.1069	108.7133	64.46	13.81	1.70	13.0383	13.42
240	0.1034	104.9142	64.46	16.11	1.68	14.8976	15.49
361	0.1030	87.3798	64.46	24.68	1.60	14.6247	19.00
482	0.1062	78.6126	64.46	28.07	1.56	17.1724	21.95
10080	0.1048	3.1270	64.46	64.46		156.3825	100.40

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 20x24 เมช

เวลา (นาที)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	0.0000	132.1019	66.05	0.00			
30	0.1020	110.4442	66.05	10.62	1.74	2.8258	5.48
60	0.1019	104.5106	66.05	13.54	1.72	4.4318	7.75
120	0.1017	94.8685	66.05	18.31	1.68	6.5554	10.95
180	0.1010	84.0397	66.05	23.79	1.63	7.5652	13.42
240	0.1025	76.0294	66.05	27.35	1.59	8.7744	15.49
300	0.1015	74.1009	66.05	28.57	1.57	10.4998	17.32
360	0.1014	69.9474	66.05	30.65	1.55	11.7462	18.97
480	0.1003	54.3717	66.05	38.75	1.44	12.3875	21.91
10080			66.05	66.05			



ตารางที่ ก.5 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 30x35 เมช

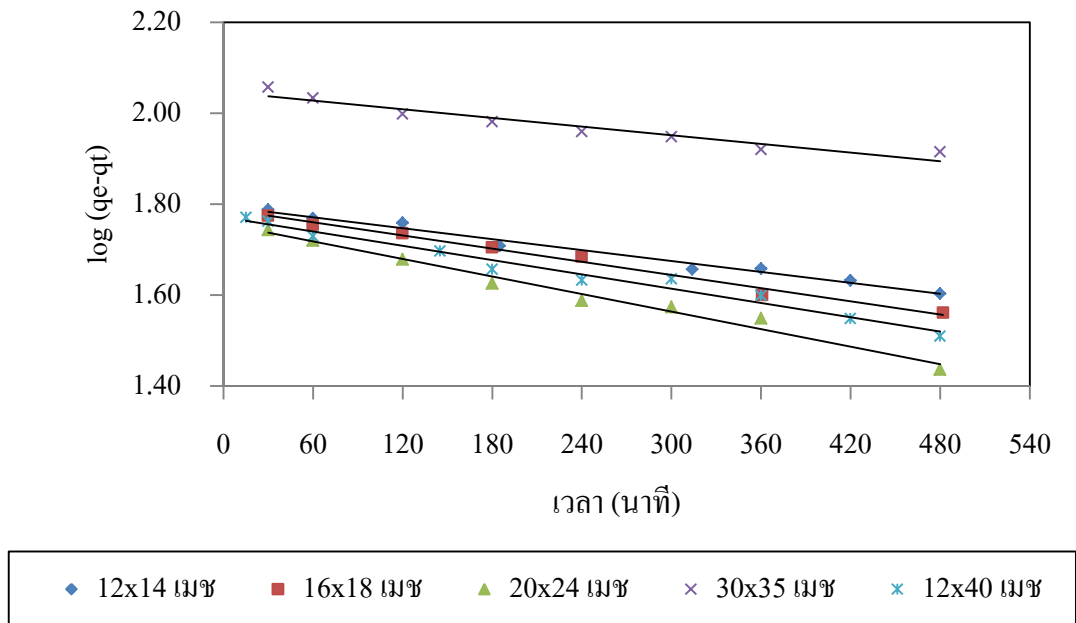
เวลา (นาที)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	0.0000	132.10	129.00	0.00			0.00
30	0.1020	101.99	129.00	14.76	2.06	2.0323	5.48
60	0.1012	89.68	129.00	20.96	2.03	2.8624	7.75
120	0.1008	72.91	129.00	29.36	2.00	4.0873	10.95
180	0.1010	65.05	129.00	33.19	1.98	5.4228	13.42
240	0.1016	55.26	129.00	37.82	1.96	6.3467	15.49
300	0.1013	50.66	129.00	40.20	1.95	7.4633	17.32
360	0.1013	39.39	129.00	45.76	1.92	7.8669	18.97
480	0.1012	37.61	129.00	46.69	1.92	10.2814	21.91
10080			129.00	129.00			

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 12x40 เมช

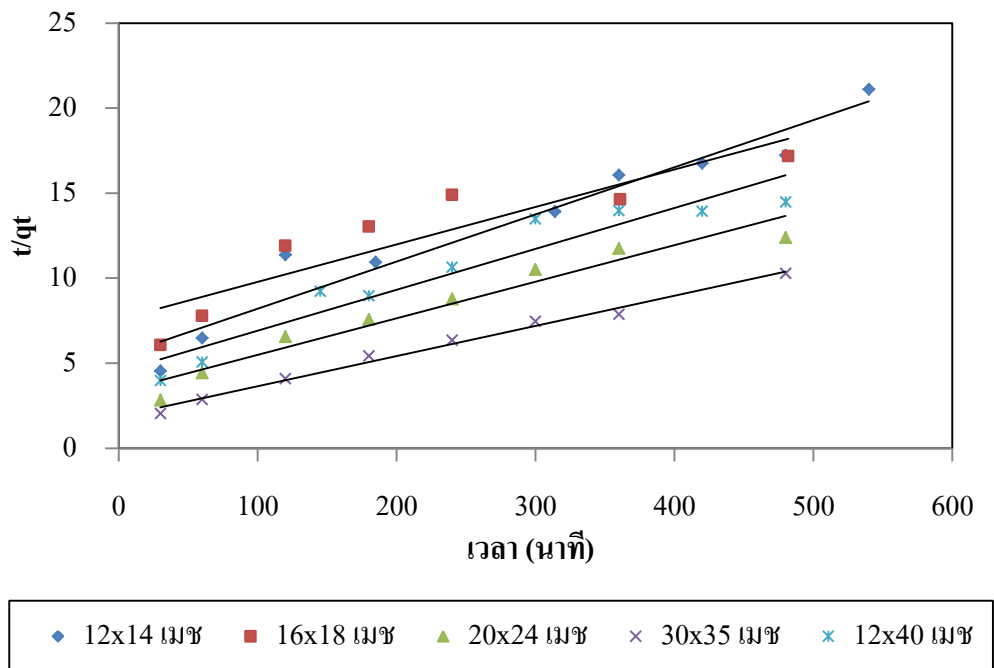
เวลา (นาที)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	0.00	138.81	65.47	0.00	0.00		
15	0.1070	124.93	65.47	6.49	1.7707	2.31	3.87
30	0.1064	122.74	65.47	7.55	1.7628	3.97	5.48
60	0.1050	113.97	65.47	11.83	1.7295	5.07	7.75
145	0.1075	105.06	65.47	15.70	1.6970	9.24	12.04
180	0.1019	97.90	65.47	20.08	1.6570	8.97	13.42
240	0.1062	90.89	65.47	22.56	1.6325	10.64	15.49
300	0.1061	91.62	65.47	22.24	1.6358	13.49	17.32
360	0.1043	85.04	65.47	25.78	1.5987	13.97	18.97
420	0.1057	75.11	65.47	30.14	1.5482	13.94	20.49
480	0.1021	71.16	65.47	33.13	1.5097	14.49	21.91
10080			65.47	65.47			

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) (ปรางศิริ ศรีสุก พันธ์, 2551)

เวลา(นาทื)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	150.000	201.680	0.000	2.305	-	0.000
0.5	113.567	201.680	104.095	1.989	0.005	0.707
1	110.715	201.680	112.243	1.952	0.009	1.000
5	106.806	201.680	123.410	1.894	0.041	2.236
10	100.257	201.680	142.123	1.775	0.070	3.162
30	95.398	201.680	156.006	1.660	0.192	5.477
60	89.482	201.680	172.907	1.459	0.347	7.746
120	87.264	201.680	179.245	1.351	0.669	10.954
180	83.989	201.680	188.602	1.117	0.954	13.416
240	81.243	201.680	196.449	0.719	1.222	15.492
300	80.657	201.680	198.123	0.551	1.514	17.321
360	80.187	201.680	199.467	0.345	1.805	18.974
480	79.412	201.680	201.680	-	2.083	20.494



รูปที่ ก.1 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน



รูปที่ ก.2 กราฟปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

## ข้อมูลวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ

ตารางที่ ก.8 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ขนาด 12x14 เมช

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	$C_0$	$C_e$	$q_e$	แลงเมียร์ไอโซเทอม		ฟรุนดลิชไอโซเทอม	
				$1/q$	$1/C_e$	$\log q$	$\log C_e$
0.1035	81.58	1.58	38.65	0.0259	0.6333	1.5871	0.1984
0.1081	121.93	1.93	55.50	0.0180	0.5182	1.7443	0.2855
0.1079	171.93	6.05	76.87	0.0130	0.1652	1.8857	0.7819
0.1034	200.58	11.81	91.28	0.0110	0.0847	1.9604	1.0724
0.1081	247.95	23.92	103.62	0.0097	0.0418	2.0155	1.3787
0.1081	299.12	21.78	128.28	0.0078	0.0459	2.1082	1.3381

ตารางที่ ก.9 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ขนาด 16x18 เมช

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	$C_0$	$C_e$	$q_e$	แลงเมียร์ไอโซเทอม		ฟรุนดลิชไอโซเทอม	
				$1/q$	$1/C_e$	$\log q$	$\log C_e$
0.1048	81.58	1.43	38.24	0.0262	0.6980	1.5825	0.1562
0.1081	121.93	2.08	55.44	0.0180	0.4817	1.7438	0.3172
0.1048	171.93	8.80	77.83	0.0128	0.1136	1.8911	0.9445
0.1078	200.58	9.59	88.59	0.0113	0.1043	1.9474	0.9818
0.1062	247.95	24.36	105.27	0.0095	0.0411	2.0223	1.3866
0.1054	299.12	48.45	118.91	0.0084	0.0206	2.0752	1.6853

ตารางที่ ก.10 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ขนาด 20x24 เมช

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	$C_0$	$C_e$	$q_e$	แลงเมียร์ไอโซเทอม		ฟรุนดลิชไอโซเทอม	
				$1/q$	$1/C_e$	$\log q$	$\log C_e$
0.1074	399.12	9.65	181.32	0.0055	0.1036	2.2584	0.9845
0.1058	472.22	24.04	211.81	0.0047	0.0416	2.3259	1.3808
0.1053	586.26	75.44	242.55	0.0041	0.0133	2.3848	1.8776
0.1067	685.67	96.78	275.96	0.0036	0.0103	2.4408	1.9858
0.1067	777.78	153.80	292.40	0.0034	0.0065	2.4660	2.1870
0.1072	969.30	287.72	317.90	0.0031	0.0035	2.5023	2.4590

ตารางที่ ก.11 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ขนาด 30x35 เมช

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	$C_0$	$C_e$	$q_e$	แลงเมียร์ไอโซเทอม		ฟรุนดลิชไอโซเทอม	
				$1/q$	$1/C_e$	$\log q$	$\log C_e$
0.1057	74.27	0.73	34.79	0.0287	1.3680	1.5414	-0.1361
0.1041	110.53	0.67	52.76	0.0190	1.4870	1.7223	-0.1723
0.1031	161.70	1.11	77.88	0.0128	0.9000	1.8914	0.0458
0.1054	190.06	1.87	89.27	0.0112	0.5344	1.9507	0.2722
0.1055	240.35	1.96	112.98	0.0089	0.5104	2.0530	0.2920
0.1021	284.50	2.63	138.04	0.0072	0.3800	2.1400	0.4202
0.1047	377.49	11.43	174.81	0.0057	0.0875	2.2426	1.0582
0.1013	494.74	35.23	226.80	0.0044	0.0284	2.3556	1.5470
0.1012	595.32	92.98	248.19	0.0040	0.0108	2.3948	1.9684
0.1075	662.57	116.67	253.91	0.0039	0.0086	2.4047	2.0669
0.1011	790.64	173.68	305.12	0.0033	0.0058	2.4845	2.2398
0.1021	936.84	304.39	309.72	0.0032	0.0033	2.4910	2.4834

ตารางที่ ก.12 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ขนาด 12x40 เมช

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	$C_0$	$C_e$	$q_e$	แลงเมียร์ไอโซเทอม		ฟรอนดลิชไอโซเทอม	
				$1/q$	$1/C_e$	$\log q$	$\log C_e$
0.1049	74.27	0.47	35.18	0.0284	2.1375	1.5463	-0.3299
0.1081	110.53	0.64	50.82	0.0197	1.5545	1.7061	-0.1916
0.1034	161.70	1.93	77.26	0.0129	0.5182	1.8879	0.2855
0.1056	190.06	2.81	88.66	0.0113	0.3563	1.9477	0.4482
0.1026	240.35	4.04	115.16	0.0087	0.2478	2.0613	0.6059
0.1080	284.50	7.13	128.41	0.0078	0.1402	2.1086	0.8534
0.1054	377.49	46.61	156.96	0.0064	0.0215	2.1958	1.6685
0.1057	494.74	106.43	183.68	0.0054	0.0094	2.2641	2.0271
0.1039	595.32	184.36	197.77	0.0051	0.0054	2.2962	2.2657
0.1080	662.57	224.27	202.92	0.0049	0.0045	2.3073	2.3508

ตารางที่ ก.13 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร, 2551)

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	$C_0$	$C_e$	$q_e$	แลงเมียร์ไอโซเทอม		ฟรอนดลิชไอโซเทอม	
				$1/q$	$1/C_e$	$\log q$	$\log C_e$
0.0348	75.00	6.72	196.21	0.0051	0.1488	2.2927	0.8274
0.0344	110.00	29.67	233.52	0.0043	0.0337	2.3683	1.4723
0.0348	130.00	51.29	226.18	0.0044	0.0195	2.3545	1.7100
0.0346	150.00	63.79	249.16	0.0040	0.0157	2.3965	1.8048
0.0346	170.00	82.88	251.79	0.0040	0.0121	2.4010	1.9184
0.0374	250.00	155.38	252.99	0.0040	0.0064	2.4031	2.1914

### ข้อมูลศึกษาประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของ ถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์

เวลา (นาที)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่าย เข้า	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.15 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.16 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 เส้นผ่านศูนย์กลางของ ถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ที่ความดันจ่ายเข้า 2 บาร์

เวลา (นาทีก)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่าย เข้า	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.17 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 12x14 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่าย เข้า	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.18 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 16x18 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่าย เข้า	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.19 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 20x24 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่าย เข้า	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.20 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 200 ของไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ความดันจ่ายเข้า 1 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ 30x35 เมช

เวลา (นาท)	อัตราการไหล (ล./วินาที)			ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ (กรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่าย เข้า	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

### ข้อมูลทางจลนศาสตร์ของการดูดซับแบบแบทช์ในระบบไฮบริด

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 12x40 เมช  
ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	150	132.38	169.52	0.00			
60	150	129.17	169.52	8.18	2.2077	7.33	7.75
120	150	123.62	169.52	19.29	2.1768	6.22	10.95
195	150	122.45	169.52	21.63	2.1700	9.02	13.96
240	150	121.28	169.52	23.96	2.1630	10.02	15.49
300	150	115.73	169.52	35.07	2.1286	8.55	17.32
360	150	113.10	169.52	40.33	2.1112	8.93	18.97
420	150	107.25	169.52	52.02	2.0701	8.07	20.49
480	150	106.67	169.52	53.19	2.0657	9.02	21.91

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 12x40 เมช  
ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	300	134.43	114.73	0.00			
60	300	118.06	114.73	16.37	1.9928	3.67	7.75
95	300	114.27	114.73	20.16	1.9757	4.71	9.75
180	300	104.33	114.73	30.10	1.9275	5.98	13.42
240	300	94.69	114.73	39.74	1.8750	6.04	15.49
300	300	92.64	114.73	41.79	1.8630	7.18	17.32
360	300	85.92	114.73	48.51	1.8210	7.42	18.97
420	300	80.37	114.73	54.06	1.7829	7.77	20.49
480	300	75.11	114.73	59.32	1.7436	8.09	21.91

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 12x40 เมช  
ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาณ GAC (กรัม)	$C_0$ (มก./ล.)	$q_e$ (มก./ก.)	$q_t$ (มก./ก.)	$\log (q_e - q_t)$	$t/q_t$	$t^{0.5}$
0	600	133.26	65.48	0.00			
60	600	113.39	65.48	9.94	1.7446	6.04	7.75
120	600	97.61	65.48	17.83	1.6781	6.73	10.95
180	600	81.53	65.48	25.86	1.5979	6.96	13.42
240	600	65.46	65.48	33.90	1.4994	7.08	15.49
300	600	50.85	65.48	41.21	1.3852	7.28	17.32
360	600	37.14	65.48	48.06	1.2411	7.49	18.97
420	600	27.82	65.48	52.72	1.1059	7.97	20.49
480	600	21.86	65.48	55.70	0.9903	8.62	21.91

ผลการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi continuous) ของระบบไฮบริดไฮโดรไซโคลน  
และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการกำจัดสีย้อม

ตารางที่ ก. 24 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่เข้า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

$Q_L = 0.5$ ล./นาที GAC = 4 ก./ล.		$Q_L = 1$ ล./นาที GAC = 2 ก./ล.		$Q_L = 1$ ล./นาที GAC = 1 ก./ล.	
t	$C_t$	t	$C_t$	t	$C_t$
0	131.07	0	4.45	0	129.75
30	101.26	60	3.95	15	121.28
60	78.61	120	3.58	30	122.16
120	49.10	180	3.18	60	111.64
180	27.30	240	3.01	120	112.80
240	16.22	300	2.77	180	111.93
300	11.84	360	2.57	240	108.13
360	8.01	428	2.51	300	107.25
420	7.10	505	2.62	360	106.67
480	6.66	540	2.61	420	105.79
540	6.34	570	2.55	480	106.67
600	6.81			540	106.96
				600	110.47
				660	106.96

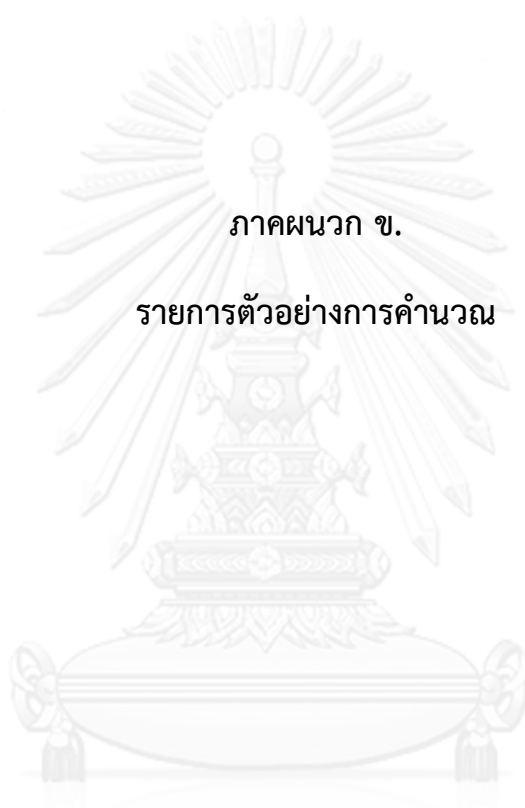
ผลการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) ของระบบไฮบริดไฮโดร  
ไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการกำจัดสีย้อม

ตารางที่ ก. 25 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 150 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำเสีย-  
สังเคราะห์ 0.5 ลิตรต่อนาที

ปริมาณ GAC (กรัม/นาที่) เวลา (นาที่)	ความเข้มข้นสีย้อมคงเหลือ (มก./ล.)				
	0.42	0.83	1.25	2.0	2.5
0	9.18	8.97	8.71	8.27	8.97
30	2.86	2.43	4.65	2.51	5.64
60	0.91	0.82	1.75	0.41	2.66
120	0.61	0.79	1.40	0.47	0.96
180	0.94	0.96	1.58	0.29	1.08
240	1.11	0.94	2.22	1.08	2.07
300	1.29	1.14	1.34	0.73	2.31
360	1.14	1.37	1.29	1.61	1.40
420	1.52	1.46	1.49	1.11	2.22
480	1.72	1.52	1.99	0.96	1.46
540	1.78	1.61	1.75	1.20	1.52
600	1.84	1.78	2.89	1.20	1.40

ภาคผนวก ข.

รายการตัวอย่างการคำนวณ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ข.1** ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12x14 เมช โดยใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 9 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ก.14)

สมมติพิจารณา ที่เวลา 15 นาที จะได้ว่าประสิทธิภาพในการแยก สามารถคำนวณได้ ดังนี้

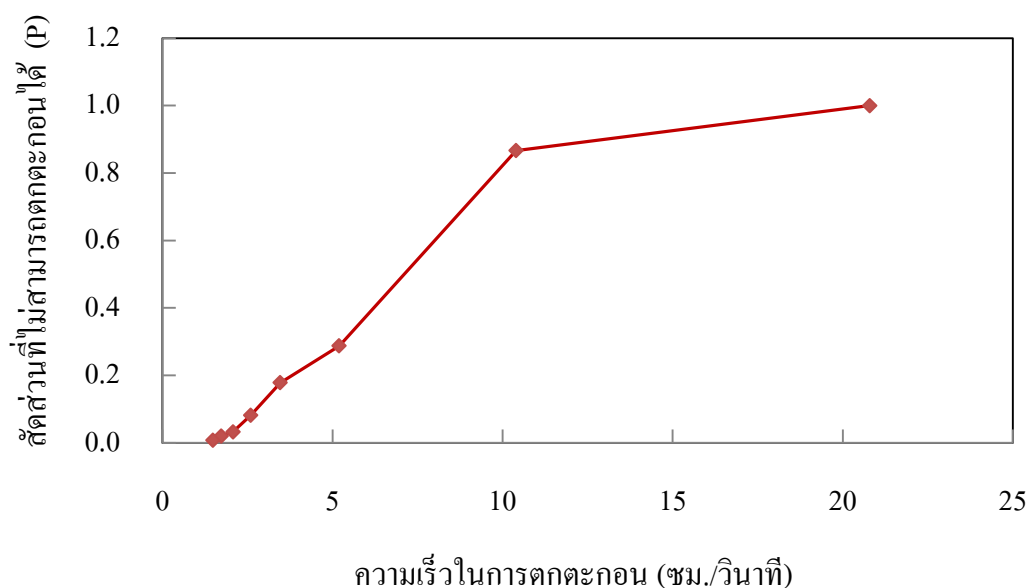
$$E'_T = \left( \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100$$

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} = \frac{0.055}{0.595} = 0.092$$

$$\text{และ } E_T = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} = \frac{0.055 \times 6.936}{0.595 \times 1.220} = 0.5255$$

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

**ภาคผนวก ข.2** ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบโตดของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนหรือแยกได้และความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค



สูตร ในการหาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบโตนด์ คือ

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

เมื่อสมมติให้อัตราการน้ำล้นผิว คือ 2 ซม./วินาที สามารถหาค่า  $P_0$  ได้จากกราฟ ข.1 เท่ากับ 0.025

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

เนื่องจากกราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลา ซึ่งมีสมการเป็น

$$P^2 = 4CV$$

จากนั้นหาค่าคงที่  $C$  โดยแทนค่า  $V = 2$  และ  $P = 0.0025$  ซึ่งจะได้ค่า  $C$  เท่ากับ 0.000078 และเมื่อเขียนสมการใหม่ ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ  $P$  ได้

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

แทนค่าได้

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

ดังนั้น

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

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม 6th ASEAN Environmental Engineering Conference จัดขึ้นที่โรงแรม Pathumwan Princess จังหวัด กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในชื่อหัวข้อ Application of Hybrid Process (GAC Adsorption and Hydrocyclone) for decolorization of dye wastewater เมื่อวันที่ 21-22 พฤศจิกายน 2556



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY