

การกำจัดสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟด้วยแอกติเวเตดสไลด์จ์



นายจิรกิตต์ ไพยรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF BASIC DYE AND REACTIVE DYE USING ACTIVATED SLUDGE

Mr. Jirakit Paiyarat



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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

จิริกิตต์ ไพยรัตน์ : การกำจัดสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟด้วยแอกติเวเตดสลัดจ์ (REMOVAL OF BASIC DYE AND REACTIVE DYE USING ACTIVATED SLUDGE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.เฟื่องฟ้า อุ่นอบ, 89 หน้า.

ใช้กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสีย จากการศึกษาค่าศักย์ซีตาร์ พื้นผิวของกากตะกอนแสดงความเป็นประจุลบ จึงใช้กากตะกอนดูดซับสีย้อม methylene blue ซึ่งเป็นสีย้อมเบสิกที่มีประจุบวก พีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue อยู่ในช่วงพีเอช 4 ถึง 10 ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 90 นาที การดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม โดยมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 182 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังการดูดซับสีย้อม methylene blue พื้นผิวของกากตะกอนแสดงความเป็นประจุลบน้อยลง จึงนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue (MB-sludge) มาดูดซับสีย้อม reactive red 22 ซึ่งเป็นสีย้อมรีแอกทีฟที่มีประจุลบ พีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge คือพีเอช 10 ระยะเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลคือ 90 นาที การดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนเป็นไปตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ โดยมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 78 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ MB-sludge ยังมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่ากากตะกอน หลังการดูดซับสีย้อม reactive red 22 กากตะกอนยังสามารถนำกลับมาใช้กำจัดสีย้อม methylene blue ในสารละลายได้อีก การเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตลงในสารละลายสีย้อม methylene blue ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ในขณะที่ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นในสารละลายสีย้อม reactive red 22 เมื่อนำ MB-sludge ไปใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอพบว่า ค่าซีไอดีของน้ำเสียลดลงหลังการดูดซับ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5787122320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: SLUDGE / BASIC DYE / REACTIVE DYE / ADSORPTION

JIRAKIT PAIYARAT: REMOVAL OF BASIC DYE AND REACTIVE DYE USING ACTIVATED SLUDGE. ADVISOR: ASST. PROF.FUANGFA UNOB, Ph.D., 89 pp.

Sludge from wastewater treatment process was used as adsorbent for the removal of basic and reactive dyes in wastewater. From zeta potential studies, sludge surface was negatively charged. Therefore, the sludge was used to adsorb methylene blue which is a positively charged basic dye. The suitable pH for methylene blue adsorption was in a range from pH 4-10. The adsorption equilibrium was attained within 90 min. The methylene blue adsorption followed Langmuir isotherm with maximum adsorption capacity of 182 mg/g. After methylene blue adsorption, the sludge surface showed less negative charge than that of the raw sludge. MB-sludge was further used to adsorb reactive red 22 which is a negatively charged reactive dye. The suitable pH for reactive red 22 adsorption by MB-sludge was pH 10. The adsorption equilibrium was reached within 90 min. The reactive red 22 adsorption followed Langmuir isotherm with maximum adsorption capacity of 78 mg/g. Moreover, MB-sludge exhibited higher adsorption efficiency compared to raw sludge. After reactive red 22 adsorption, the sludge could be reused to remove methylene blue from solution. The adding of sodium chloride and sodium sulfate in methylene blue solution decreased the adsorption efficiency, whereas in reactive red 22 solution, the adsorption efficiency increased. MB-sludge was applied to remove reactive dyes in textile dyeing wastewater and the COD of the wastewater was reduced after adsorption.

Field of Study: Environmental Science Student's Signature

Academic Year: 2016 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องฟ้า อุ่นอบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และกำลังใจ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้ความรู้ และคำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหน่วยวิจัยการวิเคราะห์เชิงสภาวะแวดล้อม (EARU) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนอุดหนุน สถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเพื่อนๆจากสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสมาชิกในหน่วยวิจัยการวิเคราะห์เชิงสภาวะแวดล้อม (EARU) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบริษัท พี.พี. คัลเลอร์ เท็กซ์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อม reactive red 22 รวมถึงข้อมูลของสีย้อม ขอกราบขอบพระคุณโรงงานผลิตอาหารสัตว์แห่งหนึ่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอแห่งหนึ่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุน รวมถึงให้กำลังใจในด้านการศึกษาลดสุดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สีย้อม.....	4
2.2 การย้อมเส้นใยด้วยสีเบสิก.....	7
2.3 การย้อมเส้นใยด้วยสีรีแอกทีฟ.....	9
2.4 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ.....	11
2.4.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย.....	11
2.4.2 ลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.....	12
2.4.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอต่อสิ่งแวดล้อม.....	12
2.4.4 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ.....	13
2.5 การดูดซับ.....	16
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ.....	16
2.5.2 กลไกของการดูดซับ.....	17
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	18

2.5.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	18
2.5.4.1 Langmuir isotherm	18
2.5.4.2 Freundlich isotherm.....	20
2.5.5 ประเภทของระบบการดูดซับ	21
2.5.6 การศึกษาและทดลองระบบการดูดซับ	23
2.6 กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย	24
2.6.1 ประเภทของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย	24
2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์ขั้นที่สอง	25
จากสมบัติของหมู่ฟังก์ชันของกากตะกอนข้างต้นทำให้มีการศึกษาการใช้กากตะกอนเป็น ตัวดูดซับสารมลพิษ โดยนำกากตะกอนมาดูดซับสาร	25
2.6.3 การบำบัดกากตะกอน.....	26
2.6.4 การกำจัดกากตะกอน	26
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 ขั้นตอนการทดลอง	32
3.2 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี.....	32
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์.....	32
3.2.2 สารเคมี.....	33
3.3วิธีดำเนินการทดลอง	34
3.3.1 การเตรียมกากตะกอน	34
3.3.2 ศึกษาสมบัติของกากตะกอน.....	34
3.3.3 ทาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน	35
3.3.3.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม methylene blue.....	35

3.3.3.2	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue	35
3.3.3.3	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue.....	36
3.3.3.4	ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue.....	36
3.3.4	หาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย กากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue.....	36
3.3.4.1	การเตรียมกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue	37
3.3.4.2	ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22.....	37
3.3.4.3	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22	37
3.3.4.4	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22.....	38
3.3.4.5	ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22.....	38
3.3.5	ศึกษาการนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 กลับมาใช้เป็นตัวดูดซับซ้ำ.....	38
3.3.5.1	การเตรียมกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และ สี ย้อม reactive red 22	38
3.3.5.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วย กาก ตะกอนและกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับ methylene blue และสีย้อม reactive red 22.....	39
3.3.6	ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22.....	39
3.3.7	การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.....	40
3.3.8	สถิติที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	41
4.1	การศึกษาสมบัติของกากตะกอน	42
4.1.1	การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR.....	42

4.1.2 การศึกษาค่าศักย์ซีต้า	44
4.1.3 การศึกษาค่าพื้นที่ผิว.....	45
4.1.4 การศึกษาพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์.....	46
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน.....	47
4.2.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม methylene blue	47
4.2.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue.....	49
4.2.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue .	50
4.2.4 กลไกการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน	55
4.3 การศึกษาสภาวะในการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับ สีย้อม methylene blue.....	56
4.3.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22	57
4.3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22.....	59
4.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22....	60
4.3.4 กลไกการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge	64
4.4 การนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 มาใช้ดูดซับสีย้อม methylene blue	65
4.5 ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22.....	66
4.6 การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
สรุปผลการวิจัย.....	68
ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2. 1 รายการสารเคมีในกระบวนการย้อมสีเบสิก.....	8
ตารางที่ 2. 2 รายการสารเคมีในกระบวนการย้อมสีรีแอกทีฟ.....	9
ตารางที่ 2. 3 มลสาร ปริมาณ และลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.....	11
ตารางที่ 2. 4 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับทางเคมี.....	17
ตารางที่ 2. 5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสีย้อมเบสิก.....	28
ตารางที่ 2. 6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ.....	30
ตารางที่ 2. 7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแบบ secondary adsorption.....	30
ตารางที่ 3. 1 วัสดุอุปกรณ์.....	32
ตารางที่ 3. 2 รายการสารเคมี.....	33
ตารางที่ 4. 1 ค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอน MB-sludge และ RR-MBsludge.....	44
ตารางที่ 4. 2 ค่าพีเอชก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม methylene blue.....	49
ตารางที่ 4. 3 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกาก ตะกอน.....	53
ตารางที่ 4. 4 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue จากการทดลอง (q_{exp}) และค่าที่ คำนวณได้จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (q_L) และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช (q_F).....	53
ตารางที่ 4. 5 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	54
ตารางที่ 4. 6 ค่าพีเอชก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม reactive red 22.....	58
ตารางที่ 4. 7 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge.....	62
ตารางที่ 4. 8 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 จากการทดลอง (q_{exp}) ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (q_L) และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช (q_F).....	62
ตารางที่ 4. 9 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	63

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 กราฟตามสมการเชิงเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอม 20

รูปที่ 2. 2 กราฟตามสมการเชิงเส้นตรงของฟรุนด์ลิชไอโซเทอม 21

รูปที่ 2. 3 breakthrough curve..... 23

รูปที่ 2. 4 รูปแบบการจัดการตะกอน 27

รูปที่ 4. 1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม methylene blue..... 41

รูปที่ 4. 2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม reactive red 22..... 41

รูปที่ 4. 3 FT-IR spectrum ของกากตะกอน (ก) methylene blue (ข) และ MB-sludge (ค)..... 42

รูปที่ 4. 4 FT-IR spectrum ของ MB-sludge (ง) reactive red 22 (จ) และ RR-MB-sludge (ฉ)..... 43

รูปที่ 4. 5 กราฟการหาพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของกากตะกอน 46

รูปที่ 4. 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนที่พีเอชต่างๆ 47

รูปที่ 4. 7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วย..... 50

รูปที่ 4. 8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue ต่อความจุของการดูดซับ 50

รูปที่ 4. 9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนตามแบบจำลอง.... 52

รูปที่ 4. 10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนตามแบบจำลอง . 52

รูปที่ 4. 11 กลไกการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน 56

รูปที่ 4. 12 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม reactive red 22 ด้วย ... 57

รูปที่ 4. 13 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย..... 59

รูปที่ 4. 14 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22 ต่อความจุของการดูดซับด้วย.. 60

รูปที่ 4. 15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ตามแบบจำลอง 61

รูปที่ 4. 16 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ตามแบบจำลอง 61

รูปที่ 4. 17 กลไกการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge.....	64
รูปที่ 4. 18 ความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนและ RR-MB-sludge	65
รูปที่ 4. 19 ความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนในสารละลายที่มี เกลือ.....	66
รูปที่ 4. 20 ความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ในสารละลายที่มี เกลือ.....	67
รูปที่ 4. 21 ค่าซีไอดีของน้ำเสียก่อนและหลังการดูดซับด้วยกากตะกอนและ MB-sludge	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สีย้อมเป็นสารเคมีที่ถูกลำเลียงมาใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เป็นต้น หากสีย้อมถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดผลกระทบต่างๆตามมามากมาย เช่น สีย้อมก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ สีย้อมบางชนิดสามารถถูกย่อยสลายตามธรรมชาติได้จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำลดลง เป็นต้น เนื่องด้วยสีย้อมบางชนิดไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อมหรือถูกย่อยสลายได้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้เกิดการสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อม การบำบัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการบำบัดสารมลพิษแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะของสารมลพิษชนิดนั้นๆ สีย้อมสามารถถูกกำจัดได้โดยการใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารออกซิไดส์ การใช้เทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology) การแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment) การสร้างตะกอนรวมทางเคมี (chemical coagulation and flocculation) และการดูดซับ (adsorption) การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อม มีวัสดุหลายชนิดที่ถูกลำเลียงมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (W. Li et al., 2011) ถ่านหิน (Yuliani et al., 2016) ไบโอสาร์จากสาหร่ายเหลือใช้ (Mahmoud et al., 2016) ถ่านกัมมันต์จากเปลือกสับปะรด (Namasivayam et al., 2007) และ graphene oxide (Konicki et al., 2017) เป็นต้น โดยกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นหนึ่งในกลุ่มวัสดุราคาถูกที่มีผู้วิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม เช่น W. Li et al. (2011) ได้นำกากตะกอนมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟ Sonai et al. (2016) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ-เคมีกับกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของโรงงานผลิตสิ่งทอ Leng et al. (2015) ได้นำกากตะกอนมาผลิตเป็นไบโอสาร์เพื่อใช้ดูดซับสีย้อมเบสิก และสกุรัตน์ รัตนาชน (2551) ได้นำกากตะกอนมาปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวกเพื่อใช้ดูดซับสีย้อมเอซิด เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมได้ก่อนที่จะนำกากตะกอนที่ใช้แล้วไปกำจัดต่อไป

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะนำกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เนื่องจากผิวของกากตะกอนประกอบด้วยส่วนที่มีขี้และไม่มีขี้ ซึ่งสามารถดูดซับสีย้อมได้ โดยนำกากตะกอนที่ได้มาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเบสิก ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีประจุบวก และเนื่องด้วยผู้วิจัยคาดว่าผิวของกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิกน่าจะยังมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิดอื่นได้อีก จึงได้นำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิกมาใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีประจุลบ กระบวนการดังกล่าวจะทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากกากตะกอนได้มากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบสิกด้วยกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ใช้กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์ของโรงงานผลิตอาหารสัตว์แห่งหนึ่ง สีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟที่ใช้คือ methylene blue และ reactive red 22 ตามลำดับ
2. ศึกษาสมบัติของกากตะกอน โดยทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี ค่าศักย์ซีต้า ค่าพื้นที่ผิว และค่าพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH at point of zero charge)
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีย้อมเบสิก โดยศึกษาผลของค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์ม
4. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิก โดยศึกษาผลของค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์ม
5. ศึกษาการนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยนำกากตะกอนดังกล่าวมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเบสิกอีกครั้ง

6. ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟ โดยใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นช่วงเดียวกับที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม
7. ทำการทดสอบกับน้ำเสียจริง โดยนำน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมาใช้ในการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
2. สามารถประยุกต์ใช้กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดต่างๆกัน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อม (dyestuffs) หมายถึง สีซึ่งเป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ใช้ในการย้อมวัสดุ ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด บางชนิดสามารถละลายน้ำได้ บางชนิดจำเป็นต้องใส่สารเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ สีย้อมจะซึมเข้าสู่วัสดุและสร้างพันธะไอออนิก (ionic bond) พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) กับองค์ประกอบของวัสดุนั้นโดยตรง ซึ่งสีที่ปรากฏเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ของโมเลกุลสีย้อมซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่แตกต่างกัน โดยพลังงานแสงที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2550) องค์ประกอบของโมเลกุลสีที่สามารถดูดกลืนพลังงานแสงและปรากฏสีออกมาเรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม ได้แก่

1. กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group): $-\text{NO}$
2. กลุ่มไนโตร (nitro group): $-\text{NO}_2$
3. กลุ่มเอโซ (azo group): $-\text{N}=\text{N}-$
4. กลุ่มเอทิลีน (ethylene group): $\text{C}=\text{C}$
5. กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group): $\text{C}=\text{O}$
6. กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group): CONH_2
7. กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group): $\text{C}=\text{S}$ หรือ $\text{C}-\text{S}-\text{S}-\text{C}$

ส่วนกลุ่มอะตอมที่ทำให้สีย้อมสามารถยึดติดกับเส้นใยได้เรียกว่า ออกโซโครม (auxochrome) ซึ่งได้แก่ OH , NH_2 , NHR_2 , NR_2 , SO_3 และ COOH หากขาดส่วนประกอบเหล่านี้จะทำให้สีย้อมไม่สามารถยึดติดกับเส้นใย เรียกโมเลกุลที่ขาดกลุ่มออกโซโครมว่า โครมาเจน (chromagen) (Shrama, 2014)

การจำแนกสีย้อมมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การจำแนกตามการใช้งาน โดยแบ่งออกเป็น 11 ประเภท (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2550)

1. สีย้อมเอซิด (acid dye) เป็นสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวและมีประจุเป็นลบ เนื่องจากมีองค์ประกอบของหมู่ซัลโฟนิค สามารถใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดเจือจางหรือเป็นกลาง โดยจะเกิดพันธะไอออนิกระหว่างสีย้อมกับเส้นใย สีย้อมเอซิดบางชนิดสามารถนำไปใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และเส้นใยอะคริลิก สีย้อมเอซิดนั้นไม่ทนต่อการซักล้างและแห้ง

2. สีย้อมไดเรกต์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นองค์ประกอบ และมีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งทำให้สีย้อมสามารถละลายน้ำได้และมีประจุเป็นลบ นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยโมเลกุลของสีย้อมจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลของเส้นใยและยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีย้อมชนิดนี้ไม่ทนต่อการซักล้าง แต่ทนต่อแสงได้ดี

3. สีย้อมเบสิกหรือสีย้อมแคทไอออนิก (basic dye or cationic dye) เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้และจะแตกตัวกลายเป็นประจุบวก มักใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และอะคริลิก โดยส่วนที่มีประจุบวกของสีย้อมเบสิกเกิดการยึดติดกับเส้นใย อย่างไรก็ตาม สีย้อมชนิดนี้ไม่เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากจะไม่ทนต่อการซักล้างและแสง

4. สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำ การย้อมจึงต้องใช้สารพา (carrier) เพื่อทำให้สีย้อมสามารถดูดซึมเข้าสู่เส้นใยได้มากยิ่งขึ้น หรืออาจทำการย้อมในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยอะซิเตท พอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิก สีย้อมชนิดนี้ทนต่อการซักล้างและแสงได้ค่อนข้างดี แต่สีจะซีดลงหากสัมผัสกับแก๊สบางชนิด เช่น ไนตรัสออกไซด์ เป็นต้น สีย้อมดิสเพอร์สสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน (amino anthraquinone)

5. สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dye) เป็นสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้และจะแตกตัวกลายเป็นประจุลบ มีสมบัติเป็นต่างเมื่อละลายอยู่ในน้ำ เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับการใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด เนื่องจากมีความคงทนในทุกสภาวะ โดยโมเลกุลของสีย้อมจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสด้วยพันธะโคเวเลนต์กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีย้อมรีแอกทีฟสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สีย้อมรีแอกทีฟที่สามารถย้อมติดได้ที่อุณหภูมิสูง (70 ถึง 75°C) และกลุ่มที่สามารถย้อมติดได้ที่อุณหภูมิต่ำ

6. สีย้อมอะโซอิก (azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ ในกระบวนการย้อมจะต้องทำการย้อมเส้นใยด้วยสารประกอบฟีนอลเสียก่อน จากนั้นจึงทำการย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเนียม โดยสารประกอบฟีนอลจะทำปฏิกิริยากับเกลือไดอะโซเนียมได้เป็นสารประกอบอะโซ สีย้อมอะโซอิกสามารถนำมาใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ไนลอน และอะซิเตท ข้อเสียของสีย้อมชนิดนี้คือ ไม่ทนต่อการซักล้าง

7. สีย้อมแว๊ต (vat dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ จึงต้องทำการรีดิวซ์และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้โมเลกุลของสีย้อมอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ ผ้าที่ผ่านการย้อมจะถูกนำไปผึ่งอากาศเพื่อให้โมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ซึ่งติดอยู่กับเส้นใยถูกออกซิไดส์กลับไปเป็นสีย้อมแว๊ต สามารถแบ่งประเภทสีย้อมชนิดนี้ตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภทคือ สีนินดิโก (indigo) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid)

8. สีย้อมมอร์แดนท์หรือสีย้อมโครม (mordant dye หรือ chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำ ต้องใช้สารประกอบโลหะออกไซด์เพื่อช่วยให้สีย้อมยึดติดกับเส้นใยได้ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก เป็นต้น สีย้อมมอร์แดนท์เหมาะกับการย้อมเส้นใยโปรตีนและพอลิเอไมด์

9. สีย้อมอินเกรน (ingrain dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการนำมาใช้ย้อมผ้า

10. สีย้อมออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำ เป็นสีย้อมที่เหมาะกับการนำมาใช้ย้อมผ้า โดยจะตกผลึกภายในเส้นใยของผ้า

11. สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ จึงต้องทำการรีดิวซ์สีย้อมเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ก่อนทำการย้อม ปัจจุบันจึงมีการผลิตสีย้อมซัลเฟอร์ออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์แล้ว สีย้อมชนิดนี้เหมาะที่จะใช้ในการย้อมผ้า ข้อเสียของสีย้อมชนิดนี้ คือ ไม่ทนต่อการซักล้าง

การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีอื่นๆ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545)

1. การจำแนกตามการแตกตัวให้ประจุ

1.1 สีย้อมที่มีประจุลบ (anionic dyes) ได้แก่ สีย้อมไคเร็กซ์ สีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมเอซิด สีย้อมแว๊ต สีย้อมซัลเฟอร์

1.2 สีย้อมที่มีประจุบวก (cationic dyes) ได้แก่ สีย้อมเบสิก

1.3 สีย้อมที่ไม่มีประจุ (non-ionic dyes) ได้แก่ สีย้อมดิสเพอร์ส

2. การจำแนกตามเส้นใยที่ใช้ย้อม

2.1 สีย้อมสำหรับเส้นใยเซลลูโลส เช่น ผ้า ลินิน ปอ ป่าน สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สีย้อมไคเร็กซ์ สีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมแว๊ต สีย้อมซัลเฟอร์

2.2 สีย้อมสำหรับเส้นใยโปรตีน เช่น ไหม ขนสัตว์ สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สีย้อมเอซิด สีย้อมเบสิก

2.3 สีย้อมสำหรับเส้นใยสังเคราะห์ เช่น พอลิเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สีย้อมดิสเพอร์ส สีย้อมเอซิด สีย้อมเบสิก

3. การจำแนกตามหมู่ช่วยละลาย

3.1 หมู่ช่วยละลายถาวร เช่น หมู่ SO_3Na , COOH , OH เป็นต้น

3.2 หมู่ช่วยละลายชั่วคราว เช่น phenoxide, sulfate, thiol, thiosulfate เป็นต้น

4. การจำแนกตามชื่อสีที่เรียก เช่น สี้อมโดเร็กซ์ สี้อมเอซิด สี้อมรีแอทิวฟ เป็นต้น

5. การจำแนกตามโครงสร้างทางเคมีของสี เช่น โครงสร้างอะโซ โครงสร้างสตีวบิน เป็นต้น

6. การจำแนกตามสีที่มองเห็น เช่น สีน้ำเงิน สีแดง สีส้ม สีดำ สีเหลือง สีชมพู เป็นต้น

สารที่จะเป็นสี้อมที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. แม้ใช้สีในปริมาณน้อยก็สามารถให้สีที่เข้มได้

2. สามารถละลายน้ำได้ง่าย โดยอาจสามารถละลายน้ำได้เองหรือละลายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี

3. สามารถติดติดกับเส้นใยได้ดีด้วยพันธะเคมีแบบต่างๆ

4. เมื่อติดติดเส้นใยแล้วมีความคงทน (fastness) ไม่ลอกหรือซีดได้ง่ายเมื่อถูกซักด้วยน้ำ

ซักแห้ง โดนแดด โดนเหงื่อ เมื่อผ่านการขัดสี สัมผัสกับควันหรือแก๊ส เป็นต้น

2.2 การย้อมเส้นใยด้วยสีเบสิก (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545)

สีเบสิกถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1856 ในช่วงแรกสีเบสิกถูกใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตทและเส้นใยไหม หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1950 ได้เกิดการค้นพบเส้นใยอะคริลิก และพบว่าสี้อมเบสิกซึ่งมีประจุบวกสามารถย้อมเส้นใยอะคริลิกซึ่งมีประจุลบได้ดี สี้อมเบสิกมีความคงทนต่อแสงและการซักล้างได้ สามารถแบ่งประเภทสี้อมเบสิกตามค่าความสามารถเข้ากันได้ของสี (Compatibility of Cationic Dyes) หรือที่เรียกย่อๆว่า ค่าเค (K-value) โดยกำหนดให้มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 สำหรับสี้อมเบสิกที่มีค่า K-1 หมายถึง สีชนิดนั้นมีความสามารถในการย้อมติดเส้นใยได้อย่างรวดเร็วที่สุด และความสามารถนี้จะลดลงตามค่าเคที่เพิ่มขึ้น สำหรับการผสมสี้อมเบสิกตั้งแต่สองชนิดเข้าด้วยกัน ผู้ทำการย้อมจะต้องคำนึงถึงค่าเค โดยต้องเลือกใช้สีเบสิกที่มีค่าเคต่างกันไม่เกิน 1 หน่วย เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสีผสมกันได้เป็นอย่างดี และสำหรับการย้อมสีเบสิกที่มีค่าเคต่ำ อาจจำเป็นต้องเติมสารหน่วงการติดสี เนื่องจากการที่สีสามารถย้อมติดเส้นใยได้รวดเร็วเกินไปอาจก่อให้เกิดปัญหาสีไม่สม่ำเสมอ สำหรับสีที่มีค่าเคเท่ากับ 1 ถึง 2 จะเหมาะกับการย้อมแบบต่อเนื่อง ส่วนค่าเค 2.5 ถึง 3.5 เหมาะกับการย้อมแบบดูดซึม ส่วนการย้อมสีอ่อนหรือการย้อมบนเส้นใยที่ยากต่อการย้อมควรใช้สี้อมที่มีค่าเค 4 ถึง 5 สำหรับการย้อมสีเบสิกลงบนเส้นใยอะคริลิกจำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากเส้นใยอะคริลิกเป็นเส้นใยที่ค่อนข้างเฉื่อยเมื่อเส้นใยถูกความร้อนที่เหมาะสมจึงจะเริ่มอ่อนตัว ส่งผลให้โครงสร้างเส้นใยเปิด และทำให้สีสามารถ

แทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ ดังนั้นกระบวนการย้อมแบบกึ่งต่อเนื่องซึ่งไม่อาศัยพลังงานในการย้อมจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ กระบวนการย้อมสีเบสิกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. กระบวนการย้อมแบบต่อเนื่อง

เป็นกระบวนการย้อมที่เหมาะสมกับการย้อมเส้นใยจำนวนมาก เริ่มต้นโดยผสมสีย้อม ตัวละลายสีย้อม บัฟเฟอร์ และน้ำเข้าด้วยกัน ใส่เส้นใยลงในสารละลาย จากนั้นจึงทำให้แห้งและนำไปอบด้วยไอน้ำ ก่อนนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น จากนั้นจึงทำให้แห้ง

2. กระบวนการย้อมแบบไม่ต่อเนื่องหรือการย้อมแบบดุดซึม

เริ่มโดยการตั้งอุณหภูมิอ่างย้อมไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส ผสมสารป้องกันน้ำกระด้าง สารช่วยเปียก โซเดียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ และสารหน่วงปฏิกิริยาการติดสีเข้าด้วยกัน ละลายสีเบสิกด้วยน้ำร้อน และเติมลงในอ่างย้อม ปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าประมาณ 3.5 ถึง 6.0 ด้วยบัฟเฟอร์ เพิ่มอุณหภูมิอ่างย้อมเป็น 80 องศาเซลเซียสอย่างรวดเร็ว และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 98 องศาเซลเซียสอย่างช้าๆ จากนั้นจึงลดอุณหภูมิให้เหลือ 60 องศาเซลเซียส นำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น

ตารางที่ 2.1 รายการสารเคมีในกระบวนการย้อมสีเบสิก

สารช่วยย้อม	หน้าที่
สารชั้น	เป็นสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้สีเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการย้อมสี ต้องเป็นสารที่ทนกรดและไม่เป็นประจุลบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกับสีย้อมเบสิกและตกตะกอน
ตัวละลายสีย้อม	เป็นสารที่ช่วยละลายสีย้อมให้สมบูรณ์ เช่น แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ เอสเตอร์ เป็นต้น
สารหน่วงปฏิกิริยาการติดสี (ประจุบวก)	สารหน่วงมักเป็นสีย้อมเบสิกที่ไม่แสดงสี ซึ่งมีความสามารถในการย้อมติดเส้นใยได้เร็วกว่าสีย้อมเบสิกที่ใช้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย สารหน่วงจะหลุดออกจากเส้นใย และสีเบสิกจะเข้ามาแทนที่จับกับเส้นใยแทน สารหน่วงมักถูกใช้กับการย้อมสีอ่อนๆ
สารหน่วงปฏิกิริยาการติดสี (ประจุลบ-ไม่มีประจุ)	สารหน่วงชนิดนี้จะจับตัวกับสีย้อมเบสิก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย สารหน่วงจะหลุดออกจากสีเบสิก และปล่อยให้สีเบสิกจับกับเส้นใย
บัฟเฟอร์	ช่วยปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 6.0

ตารางที่ 2.1 รายการสารเคมีในกระบวนการย้อมสีเบสิก (ต่อ)

สารช่วยย้อม	หน้าที่
โซเดียมซัลเฟต	เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาการติดสีอย่างอ่อนๆ
สารป้องกันน้ำกระด้าง	ช่วยป้องกันไม่ให้สีเบสิกจับกับไอออนในน้ำและเกิดการตกตะกอนหรือได้สีที่ไม่ตรงกับความต้องการ
สารช่วยเปียกชนิดไม่มีประจุ	เป็นสารที่ช่วยให้เกิดการย้อมติดอย่างสม่ำเสมอ

2.3 การย้อมเส้นใยด้วยสีรีแอกทีฟ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545)

สีรีแอกทีฟถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1951 โดย Imperial Chemical Incorporation เพื่อใช้แทนสีย้อมเซลลูโลสชนิดอื่นซึ่งไม่คงทนต่อการซักล้าง โดยสีรีแอกทีฟมีหมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดพันธะโคเวเลนต์กับเส้นใยเซลลูโลสในสถานะต่าง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สีรีแอกทีฟมีสมบัติด้านความคงทนต่อการซักล้าง สามารถย้อมได้ทั้งในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง เมื่อจุ่มเส้นใยเซลลูโลสลงในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟ ประจุลบบนเส้นใยจะป้องกันไม่ให้สีรีแอกทีฟซึ่งมีประจุลบเข้าใกล้เส้นใย ส่งผลให้สีย้อมแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้น้อย เมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์หรือเกลือลงในสารละลาย ไอออนบวกของเกลือจะเข้าไปจับกับประจุลบของเส้นใย ส่วนประจุลบของเกลือจะทำให้สารละลายมีความเป็นลบบมากยิ่งขึ้น จึงเกิดการผลักสีย้อมให้แทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้มากยิ่งขึ้น ส่วนการเติมด่างให้สารละลายมีค่าพีเอชประมาณ 10.5 ถึง 11.0 จะทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสีย้อมและเส้นใยขึ้น

ตารางที่ 2. 2 รายการสารเคมีในกระบวนการย้อมสีรีแอกทีฟ

สารช่วยย้อม	หน้าที่
โซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟต	เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ลดประจุของเส้นใย และช่วยผลักให้สีย้อมแทรกซึมเข้าสู่เส้นใย
ด่าง	เป็นสารที่ทำให้พีเอชของสารละลายอยู่ในช่วง 10.5 ถึง 11 เพื่อให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสีย้อมกับเส้นใย

กระบวนการย้อมสีรีแอกทีฟสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. กระบวนการย้อมแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.1 กระบวนการบีบอัด-ทำแห้ง-ผืนกสี

สำหรับชุดบีบอัดจะทำการผสมเส้นใย สารละลายสีย้อม ต่าง และเกลือแกงหรือเกลือโซเดียมซัลเฟตเข้าด้วยกัน หลังการย้อมจึงนำเส้นใยไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และทำการผืนกสีที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น จากนั้นนำเส้นใยไปอบให้แห้งด้วยลูกกลิ้งร้อนเป็นขั้นตอนสุดท้าย

1.2 กระบวนการบีบอัด-ทำแห้ง-บีบอัด

สำหรับชุดบีบอัดจะทำการผสมเส้นใย สารละลายสีย้อม และเกลือเข้าด้วยกันโดยยังไม่ใส่ต่าง เพื่อป้องกันไม่ให้อ้อมแตกตัวและแสดงประจุลบในสารละลายมากเกินไป ซึ่งสามารถแก้ปัญหาสีติดไม่เท่ากันได้ จากนั้นจึงนำเส้นใยไปอบแห้ง นำเส้นใยมาทำการบีบอัดอีกครั้งด้วยสารละลายเกลือและต่าง นำไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 ถึง 150 องศาเซลเซียส

2. กระบวนการย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง

กระบวนการนี้ทำโดยผสมเส้นใยกับสารในการย้อมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง ปล่อยให้สีแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยโดยไม่ใช้พลังงานในการย้อม แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้เวลานานประมาณ 12 ถึง 24 ชั่วโมง

3. กระบวนการย้อมแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

3.1 การย้อมแบบปกติ

ผสมสารละลายสีย้อมเข้ากับเกลือ ใส่เส้นใยลงในสารละลายและทิ้งไว้ จากนั้นจึงเติมต่างและเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส หลังการย้อมเสร็จสิ้นจึงนำเส้นใยไปทำการล้าง

3.2 การย้อมแบบใช้อุณหภูมิคงที่

เริ่มโดยการตั้งอุณหภูมิอ่างย้อมไว้ที่ 80 องศาเซลเซียสแล้วจึงผสมเส้นใย สารละลายสี และเกลือเข้าด้วยกัน แช่ทิ้งไว้ จากนั้นจึงเติมต่าง หลังการย้อมเสร็จสิ้นจึงนำเส้นใยไปทำการล้าง

2.4 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.4.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

1. น้ำที่ใช้ในกระบวนการลอกแป้ง การขจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาว การชุบมัน การย้อมสี และการตกแต่งสำเร็จ
2. น้ำจากหม้อน้ำ เนื่องจากกระบวนการย้อมสีจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการพ่นสีให้ติดอยู่กับเส้นใย ซึ่งไอน้ำเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการควบแน่น
3. น้ำหล่อเย็น ซึ่งมาจากกระบวนการลดอุณหภูมิของน้ำย้อม น้ำหล่อเย็นเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
4. น้ำจากการล้างเครื่องมือ การทำความสะอาดภายในโรงงาน ซึ่งอาจมีความสกปรกสูงขึ้นอยู่กับสิ่งล้าง เช่น น้ำจากการล้างถังเตรียมสีจะมีความสกปรกสูง เป็นต้น
5. น้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ เช่น จากการใช้งานของพนักงานโรงงาน เป็นต้น

ตารางที่ 2. 3 มลสาร ปริมาณ และลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

กระบวนการ	มลสารในน้ำทิ้ง	ปริมาณน้ำทิ้ง	ลักษณะของน้ำทิ้ง
ลอกแป้ง	แป้ง กลูโคส ไขมัน เรซิน	50 ลิตรต่อผ้า 1 กิโลกรัม	มีบีโอดี 30 ถึง 35%
ขจัดสิ่งสกปรก	เส้นใย โซดาไฟ โซดาแอช โซเดียมซัลเฟต ไขมัน	10 ลิตรต่อผ้า 1 กิโลกรัม	มีบีโอดี 30% เป็นด่างแรง มีสีดำ
ฟอกขาว	สารออกซิไดซ์	ปริมาณน้อย	มีบีโอดี 5%
ชุบมัน	โซดาไฟ	ปริมาณน้อย	มีบีโอดีต่ำ เป็นด่างแรง
ย้อมสี	สีย้อม สารรีดิวซิ่ง เกลือ	ปริมาณมาก	มีสีเข้ม มีบีโอดีสูง มีบีโอดีค่อนข้างสูง
ตกแต่งสำเร็จ	แป้ง สารตกแต่ง เกลือ	ปริมาณน้อยมาก	มีบีโอดีสูง เป็นด่าง

2.4.2 ลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยมีค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) ประมาณ 100 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500 ถึง 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะมาจากแป้ง สิ่งเจือปนจากเส้นใย สีย้อม ไขมัน ตัวทำละลายต่างๆ เป็นต้น
2. มีค่าพีเอชสูงหรือมีความเป็นด่างสูง โดยมีค่าพีเอชประมาณ 9 ถึง 12 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้เบสในกระบวนการกำจัดสิ่งสกปรก
3. มีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส
4. มีสีเข้ม ซึ่งเกิดจากกระบวนการย้อมสี เนื่องจากเส้นใยสามารถดูดซับสีย้อมได้เพียงบางส่วน จึงทำให้มีสีย้อมหลงเหลือ โดยมีปริมาณ 5 ถึง 50% ของปริมาณสีย้อมที่ใช้
5. มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (dissolved solids) สูง
6. มีปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids) สูง
7. อาจมีโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสีย เนื่องจากสีย้อมบางชนิดมีองค์ประกอบเป็นโลหะหนัก

2.4.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอต่อสิ่งแวดล้อม

1. สารอินทรีย์มีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต อาจเกิดสภาพไร้อากาศ (anaerobic) ขึ้นในแหล่งน้ำ ส่งผลให้แหล่งน้ำเกิดความเน่าเหม็นและไม่สามารถนำน้ำมาใช้ประโยชน์ได้
2. น้ำที่มีค่าพีเอชสูง ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโดยปกติสิ่งมีชีวิตสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง ซึ่งมีค่าพีเอช 6 ถึง 9
3. น้ำที่มีอุณหภูมิสูงสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต
4. สีของสีย้อมทำให้แสงส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตในระบบนิเวศแหล่งน้ำ และยังทำให้ทัศนียภาพของแหล่งน้ำเกิดความเสื่อมโทรม
5. ของแข็งที่ละลายน้ำสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้
6. ของแข็งแขวนลอยจะลดการส่องผ่านของแสงที่ลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตในระบบนิเวศแหล่งน้ำ
7. โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

2.4.4 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมจากฟอกย้อมสิ่งทอ

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน
ดังต่อไปนี้

1. การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น

การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (primary treatment) เป็นการกำจัดสารแขวนลอยขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย เช่น เศษผ้า เส้นใย เป็นต้น และยังเป็น การปรับปรุงสภาพของน้ำเสียให้เหมาะกับการบำบัดในขั้นตอนต่อไปอีกด้วย โดยมีวิธีการบำบัดดังต่อไปนี้

1.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยตะแกรง

การกรองด้วยตะแกรง (screening) เป็นการนำตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียดมาใช้ในการกำจัดสารแขวนลอย โดยสารแขวนลอยจะถูกดักจับอยู่บนตะแกรง

1.2 การปรับสภาพสมดุล

การปรับสภาพสมดุล (equalization) เป็นการปรับอัตราการไหลและความเข้มข้นของน้ำเสียที่จะเข้าไปสู่ระบบบำบัดในขั้นตอนต่อไปให้มีความสม่ำเสมอด้วยการเก็บน้ำเสียไว้ในถังปรับสภาพก่อนปล่อยออกสู่กระบวนการบำบัด นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมักจะมีอุณหภูมิสูง จึงต้องทำการปรับอุณหภูมิให้เย็นลงเสียก่อน เพื่อให้มีอุณหภูมิที่พอเหมาะต่อการบำบัดทางชีวภาพ

1.3 การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง

ค่าพีเอชของน้ำเสียจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดทางชีวภาพ โดยทั่วไประบบบำบัดทางชีวภาพจะทำงานได้ดีในสภาวะเป็นกลาง จึงจำเป็นต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เป็นกลางด้วยถังปรับพีเอช โดยการใช้กรดหรือเบส

2. การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ (secondary treatment)

การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ (secondary treatment) เป็นขั้นตอนในการบำบัดสารอินทรีย์ รวมไปถึงสารแขวนลอยหรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ไม่สามารถบำบัดได้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น โดยทั่วไปจะใช้การบำบัดทางชีวภาพ หรือทำการบำบัดทางเคมีแล้วตามด้วยการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งมีกระบวนการดังต่อไปนี้

2.1 ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์

ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (activated sludge) เป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถังเติมอากาศ โดยจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว ในการเดินระบบจะต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และปริมาณจุลินทรีย์ที่ใช้ จุลินทรีย์ในระบบจะเพิ่มจำนวนขึ้นและเกิดการรวมตัวกันตกตะกอนลงสู่ก้นถัง ตะกอนจุลินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบบำบัด และตะกอนจุลินทรีย์อีกส่วนหนึ่งต้องนำไปกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ

2.2 ระบบสระเติมอากาศ

ระบบสระเติมอากาศ (aerated lagoon) เป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในสระที่มีการเติมอากาศ โดยจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และเพิ่มจำนวนมากขึ้น ก่อนเกิดการรวมตัวกันตกตะกอนลงสู่ก้นสระ ระบบสระเติมอากาศมีความแตกต่างจากระบบแอกติเวเตดสลัดจ์คือ ในระบบสระเติมอากาศจะไม่มี การนำตะกอนจุลินทรีย์กลับมาใช้ใหม่

2.3 ระบบบ่อปรับเสถียร

ระบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond) เป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในบ่อตามธรรมชาติ โดยจุลินทรีย์อาศัยออกซิเจนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของผู้ผลิตในแหล่งน้ำในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยในระบบนี้จะมีทั้งจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) ในกระบวนการหายใจ ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของบ่อ

แม้จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ แต่เนื่องด้วยสีย้อมบางชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงจำเป็นต้องนำเทคนิคในการบำบัดอื่น ๆ มาใช้ในการบำบัดสีย้อม ซึ่งได้แก่

1. การสร้างตะกอนรวมทางเคมี

การสร้างตะกอนรวมทางเคมี (chemical coagulation and flocculation) เป็นการนำสารเคมี เช่น สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารพอลิอิเล็กโทรไลต์มาผสมกับน้ำเสียและทำการกวนอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนและเกิดเป็นตะกอนเรียกขั้นตอนนี้ว่า coagulation และเรียกสารที่ใช้สร้างตะกอนว่า coagulant จากนั้นจึงทำการกวนช้าเพื่อให้ตะกอนเกิดการรวมตัวกัน เรียกขั้นตอนนี้ว่า flocculation เมื่อตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นจะตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้

2. การใช้สารออกซิไดส์

การใช้สารออกซิไดส์ (oxidizing agents) เป็นเทคนิคในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารเคมีที่สามารถออกซิไดส์สารประกอบที่ปนเปื้อนในน้ำให้กลายเป็นสารที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือเกิดการสลายตัวในที่สุด ตัวอย่างสารออกซิไดส์ ได้แก่ สารประกอบคลอรีนจำพวกแก๊สคลอรีนหรือคลอรีนไดออกไซด์ และแก๊สโอโซน เรียกกระบวนการที่ใช้สารประกอบคลอรีนว่า chlorination หากใช้โอโซนจะเรียกว่า ozonation ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดจะขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และความเข้มข้นของสารออกซิไดส์

3. การแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า

การแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) เป็นการใช้ไฟฟ้า กระแสตรงร่วมกับแผ่นเมมเบรนในการบำบัดสารที่มีประจุออกจากน้ำเสีย โดยระบบประกอบด้วยแผ่นเมมเบรนชนิด cation exchange membrane และ anion exchange membrane ซึ่งถูกวางสลับกัน ผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบโดยให้กระแสไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ สารที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่าน cation exchange membrane ไปยังขั้วแคโทด ส่วนสารที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่สวนทางกับกระแสไฟฟ้าผ่าน anion exchange membrane ไปยังขั้วแอโนด

4. การใช้เทคโนโลยีเมมเบรน

การใช้เมมเบรนในการกรองสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (membrane filtration) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน (ultrafiltration) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) สำหรับกระบวนการอัลตราฟิวเตรชันเป็นการแยกสารที่มีขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง 1×10^{-2} มิลลิเมตรออกจากน้ำเสียด้วยการอัดน้ำผ่านเมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตทหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ ส่วนกระบวนการออสโมซิสผันกลับเป็นการแยกสารที่มีขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มิลลิเมตรออกไปจากน้ำเสีย ดังนั้นกระบวนการออสโมซิสผันกลับจึงสามารถคัดแยกสารที่มีขนาดเล็กได้มากกว่ากระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน

นอกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการพอกย้อมสิ่งทอข้างต้น การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กำจัดสีย้อมได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.5 การดูดซับ (พรชวรณ ศรีนาค, 2552)

การดูดซับ (adsorption) เป็นการใช้วัสดุบางชนิดที่สามารถดึงสารมลพิษออกจากน้ำเสียหรืออากาศให้มาเกาะติดอยู่กับผิวของวัสดุที่ใช้ดูดซับได้ โดยวัสดุที่ใช้ในการดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนมลพิษที่ถูกดึงดูดให้มาเกาะติดอยู่กับผิวของตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ตัวดูดซับมีหลากหลายชนิดและมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) การดูดซับประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า desorption ดังนั้น การดูดซับทางกายภาพจึงเป็นอันตรกิริยาแบบผันกลับได้ (reversible interaction) และยังสามารถเกิดการดูดซับได้ทั้งแบบชั้นเดียว (monolayer) และแบบหลายชั้น (multilayer)

2. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เป็นการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับ และเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับได้เป็นสารประกอบชนิดใหม่ ซึ่งจะเกิดกับบริเวณที่มีหมู่ active ที่สามารถเกิดอันตรกิริยาที่มีความจำเพาะกับตัวถูกดูดซับ จึงมักทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ และเนื่องจากตัวถูกดูดซับจะทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับและเกิดเป็นสารประกอบใหม่ จึงทำให้ไม่สามารถเกิด desorption หรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible interaction) นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

ตารางที่ 2. 4 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ผันกลับไม่ได้
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	ชั้นเดียวหรือหลายชั้น	ชั้นเดียว

2.5.2 กลไกของการดูดซับ

1. การขนส่งทั้งก้อน (bulk transfer) เป็นขั้นตอนแรกและเกิดขึ้นได้รวดเร็วที่สุด โดยตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากสารละลายเข้าหาตัวดูดซับ
2. การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวบางๆที่ล้อมรอบตัวดูดซับ ซึ่งกลไกนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นขั้นตอนที่สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (pore diffusion) ซึ่งกลไกนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง
4. การดูดซับ เป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กย่อมมีพื้นที่ผิวมาก และทำให้เกิดการดูดซับได้มาก
2. คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำมักจะถูกแยกออกจากสารละลายได้ดี ทำให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้น ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ โดยตัวถูกดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะสามารถเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าตัวถูกดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่
3. ความเร็วในการผสม อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ ซึ่งขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับมีอยู่ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มและการขนส่งภายในอนุภาค หากใช้ความเร็วในการผสมสูงจะทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนาน้อยลง ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็วขึ้น
4. ระยะเวลาสัมผัส ระยะเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษที่มากพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการดูดซับสารมลพิษด้วยตัวดูดซับ
5. ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการแตกตัวของไอออนและความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับและประจุบนผิวของตัวดูดซับ

2.5.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

2.5.4.1 Langmuir isotherm

การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ โดยมีแนวคิดที่ว่า สารถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ จนกระทั่งเมื่ออัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ แสดงว่าระบบเข้าสู่สมดุล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ จะทำให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้น จนกระทั่งผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมจนเต็ม สมการการดูดซับของแลงเมียร์ พัฒนาขึ้นโดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ตำแหน่งของการดูดซับมีจำนวนคงที่และจำกัด มีค่าพลังงานในการดูดซับแต่ละตำแหน่งเท่ากัน
2. แต่ละตำแหน่งของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 1 โมเลกุลหรือไอออน จึงเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว
3. การดูดซับสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้
4. ที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตรา desorption

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการ (2.1)

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.1)$$

- โดย C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 q_e = น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 q_m = น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
 b = ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

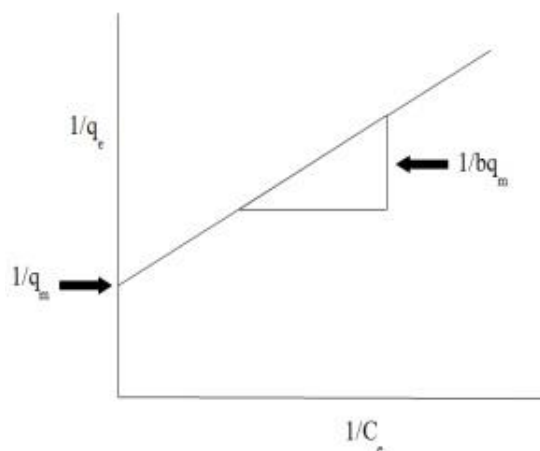
เมื่อนำสมการ (2.1) มาปรับเปลี่ยนใหม่จะได้สมการ (2.2) และ (2.3) และเมื่อนำ C_e มาหารจะได้สมการ (2.4)

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

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

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

ค่าคงที่ q_m และ b คำนวณได้โดยนำผลการทดลองมาสร้างกราฟระหว่างค่า $1/q_e$ กับค่า $1/C_e$ กราฟที่ได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (รูปที่ 2.1) มีค่าความชันเท่ากับ $1/(q_m b)$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$



รูปที่ 2. 1 กราฟตามสมการเชิงเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอม

2.5.4.2 Freundlich isotherm

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟรอนด์ลิชไอโซเทอรัมใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) ในระบบของเหลว แสดงดังสมการ (2.5)

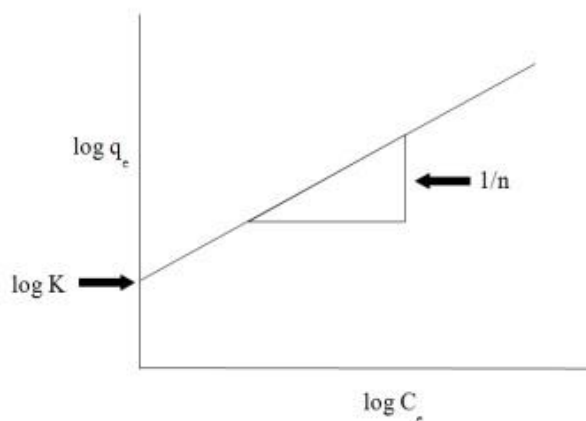
$$q_e = kC_e^{1/n} \quad (2.5)$$

- โดย C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 q_e = น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 n = ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช
 k = ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (L/g)

จากสมการ (2.5) ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบเอกโปเนนเชียลสามารถเขียนให้เป็นสมการเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของ logarithmic ได้ดังสมการ (2.6)

$$\log q_e = \log k + \left(\frac{1}{n}\right)C_e \quad (2.6)$$

เมื่อนำผลการทดลองมาสร้างกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 2.2) ที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$



รูปที่ 2. 2 กราฟตามสมการเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิชไอโซเทอม

2.5.5 ประเภทของระบบการดูดซับ

1. การบำบัดแบบกะ (batch treatment) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยการนำน้ำเสียมาควมผสมกับตัวดูดซับในระยะเวลาที่มากพอ จากนั้นแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสีย การบำบัดแบบกะอาจทำแบบขั้นตอนเดียว (single-stage treatment) หรืออาจทำแบบหลายขั้นตอน (multi-stage treatment) ซึ่งเป็นการนำน้ำเสียจากการบำบัดในครั้งแรกมาทำการดูดซับอีกครั้งด้วยตัวดูดซับใหม่

2. การบำบัดแบบต่อเนื่อง (continuous treatment) เป็นการบำบัดโดยให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับที่ถูกบรรจุไว้ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจแบ่งออกเป็นหลายแบบ ได้แก่

2.1 Fixed-bed system เป็นระบบที่ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบโดยที่ชั้นของตัวดูดซับไม่เคลื่อนที่ สามารถแบ่งการบำบัดด้วยวิธีนี้ได้อีกเป็น

2.1.1 Fixed-bed single column

2.1.2 Fixed-bed downflow in series

2.1.3 Fixed-bed downflow in parallel

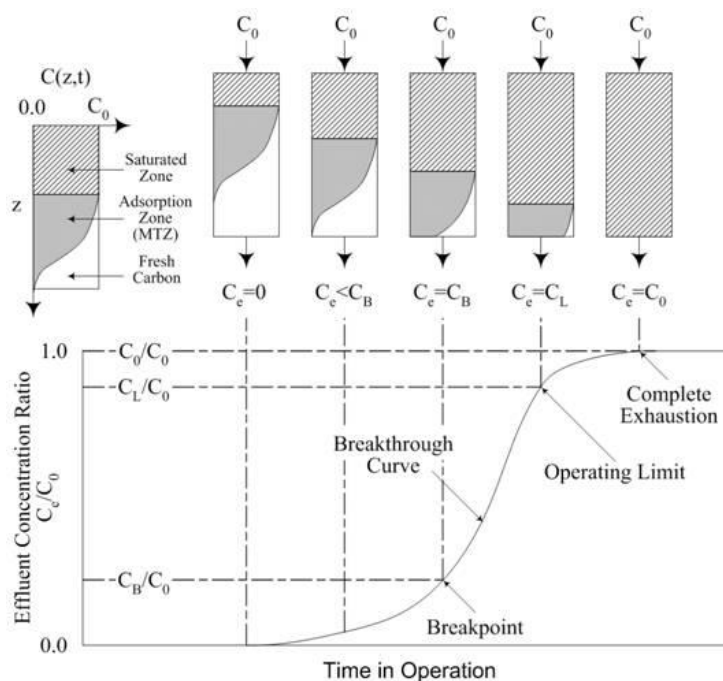
2.2 Moving bed system เป็นระบบที่ป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ด้วยแรงดัน ซึ่งจะทำให้ตัวดูดซับเกิดการเคลื่อนที่ตามแรงดันของน้ำเรียก expanded bed system หากมีแรงดันมากพอจนทำให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ตลอดเวลาเรียก moving bed system แบ่งเป็น 3 ระบบ ได้แก่

2.2.1 Expanded bed single column

2.2.2 Upflow expanded bed in series

2.2.3 Moving bed system

การดูดซับในระบบบำบัดแบบกะกับแบบต่อเนื่องมีความแตกต่างกัน เมื่อน้ำเสียไหลผ่านลงมาในคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับอยู่ การดูดซับเกิดขึ้นก่อนในบริเวณด้านบนสุดของตัวดูดซับ (ดังรูปที่ 2.3) เมื่อน้ำเสียไหลผ่านลงมาเรื่อยๆ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะต่ำลงจนเข้าสู่สภาวะสมดุล บริเวณที่เกิดการดูดซับเรียกว่า Mass Transfer Zone (MTZ) เมื่อผ่านน้ำเสียในปริมาตรที่มากขึ้นเข้าสู่คอลัมน์ ตัวดูดซับด้านบนจะอิ่มตัวและไม่สามารถดูดซับได้อีก MTZ จึงเลื่อนลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการหลุดลอกของสารมลพิษออกมาพร้อมน้ำเสีย (breakpoint, C_B) ซึ่งหลังจาก breakpoint ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ตกค้างในน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะสูงขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาในการบำบัด เนื่องจากตัวดูดซับในคอลัมน์อิ่มตัวมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อตัวดูดซับทั้งคอลัมน์ไม่สามารถดูดซับได้แล้ว ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีค่าคงที่เท่ากับความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียเริ่มต้นก่อนผ่านคอลัมน์ ($C_e=C_0$) ณ จุดนี้จะถือว่าตัวดูดซับหมดอายุการใช้งาน (exhaustion) ซึ่งหากต่อคอลัมน์แบบอนุกรม น้ำเสียจะไหลผ่านเข้าไปยังคอลัมน์อันถัดไป และสามารถดำเนินการบำบัดต่อไปได้โดยไม่ต้องหยุดดำเนินการระบบ ส่วนตัวดูดซับในคอลัมน์แรกอาจถูกนำไปทำการฟื้นฟูสภาพเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการดูดซับได้อีก เมื่อนำผลการทดลองมาสร้าง breakthrough curve ซึ่งเป็นกราฟที่พล็อตระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากคอลัมน์หารด้วยความเข้มข้นเริ่มต้น (C_e/C_0) หรือระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากคอลัมน์ ปัจจัยที่มีผลต่อ breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนและอัตราการไหลของน้ำ หากน้ำมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมาก หรือใช้อัตราการไหลของน้ำสูงจะทำให้เกิด breakpoint อย่างรวดเร็ว แต่หากน้ำมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ หรือใช้อัตราการไหลของน้ำต่ำจะทำให้เกิด breakpoint ช้าลง



รูปที่ 2.3 breakthrough curve (Rensselaer, 2013)

2.5.6 การศึกษาและทดลองระบบการดูดซับ

ในการออกแบบระบบการดูดซับจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษเสียก่อน เพื่อที่จะกำหนดค่าในการออกแบบได้อย่างเหมาะสม โดยขั้นตอนในการศึกษาและทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (laboratory test) เป็นการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษแบบกะ (batch) โดยสามารถหาค่าความจุของการดูดซับ (adsorption capacity) ได้ด้วยการใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสารละลาย

2. การทดสอบแบบโรงงานทดลอง (pilot column test) เป็นการทดสอบแบบต่อเนื่อง (continuous system) โดยการบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ขนาดเล็ก ทำการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ตรวจติดตามความเข้มข้นของสารที่ออกจากคอลัมน์ สร้าง breakthrough curve และพิจารณาความสามารถของคอลัมน์ที่สามารถใช้ได้จนกระทั่งน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงสุดตามที่ต้องการ

2.6 กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

2.6.1 ประเภทของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (National Programme on Technology Enhanced Learning, n.d.)

กากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย หมายถึง ตะกอนของแข็งที่สามารถแยกออกจากน้ำเสีย แขนงลอยอยู่ในน้ำเสีย หรือละลายอยู่ในน้ำเสีย รวมถึงตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. สลัดจ์ขั้นต้น (primary sludge) เป็นสลัดจ์ที่เกิดจากของแข็งที่ถูกแยกออกจากน้ำเสียผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น ตะกอนมักมีสีเทา ค่อนข้างหยาบ มีกลิ่นเหม็น ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประมาณ 60 ถึง 80%

2. สลัดจ์ขั้นที่สอง (secondary sludge) เป็นสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ด้วยกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะใช้อินทรีย์ในน้ำเสียเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อสร้างเซลล์ใหม่และเป็นพลังงานในการดำรงชีวิต ทำให้จุลินทรีย์ในน้ำเสียเพิ่มจำนวนขึ้น โดยมีการนำจุลินทรีย์บางส่วนออกจากระบบเพื่อควบคุมปริมาณให้มีความพอเหมาะ เรียกจุลินทรีย์ส่วนนี้ว่า สลัดจ์ส่วนเกิน (excess sludge) สลัดจ์จำพวกนี้จึงประกอบด้วยเซลล์จุลินทรีย์เป็นหลัก มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ประมาณ 75 ถึง 90% มักมีสีน้ำตาล

3. สลัดจ์ขั้นที่สาม (tertiary sludge) เป็นสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดขั้นสูง เช่น การใช้เทคโนโลยีเมมเบรน การใช้สารออกซิไดส์ การใช้จุลินทรีย์ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น ลักษณะของตะกอนจึงขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ อาจเป็นตะกอนเคมีที่เกิดจากกระบวนการบำบัดด้วยสารเคมี หรืออาจเป็นกากตะกอนที่มีลักษณะคล้ายสลัดจ์ขั้นที่สองซึ่งเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน เป็นต้น

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์ขั้นที่สอง

สลัดจ์จากกระบวนการบำบัดขั้นที่สองเกิดจากการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยสลัดจ์คือมวลจุลินทรีย์ที่ตกตะกอนลงสู่ก้นถังตกตะกอนหลังการบำบัด ดังนั้นสลัดจ์ชนิดนี้จึงประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในสลัดจ์มีทั้งชนิด Volatile Organic Compounds (VOCs) หรือสารอินทรีย์ระเหยง่าย และ fixed carbon หรือคาร์บอนคงตัว สารประกอบหลักที่มีอยู่ในสลัดจ์เป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ที่พบในส่วนต่างๆของเซลล์จุลินทรีย์ (Ogilvie, 1998) เช่น เพปทิโดไกลแคนเป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์จุลินทรีย์ โปรตีนและไขมันชนิดฟอสโฟลิพิดเป็นองค์ประกอบหลักของเยื่อหุ้มเซลล์ Extracellular Polymer Substrates (EPS) ซึ่งเป็นสารเหนียวที่จุลินทรีย์สร้างออกมานอกเซลล์เพื่อปกป้องเซลล์มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้ผิวของสลัดจ์แสดงความเป็นประจุบวกหรือลบบนอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยในสารละลายที่มีพีเอชต่ำเกิด protonate ของหมู่เอมีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของโมเลกุลโปรตีน หมู่เอมีนได้รับโปรตอนจากสารละลายทำให้หมู่ฟังก์ชันแสดงความเป็นประจุบวก ส่วนในสารละลายที่มีพีเอชสูง หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลซึ่งเป็นองค์ประกอบของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน หมู่ฟอสโฟเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบของโมเลกุลไขมันเกิด deprotonate หรือให้โปรตอนกับสารละลาย ทำให้หมู่ฟังก์ชันแสดงความเป็นประจุลบ (Junxiong et al., 2009)

จากสมบัติของหมู่ฟังก์ชันของกากตะกอนข้างต้นทำให้มีการศึกษาการใช้กากตะกอนเป็นตัวดูดซับสารมลพิษ โดยนำกากตะกอนมาดูดซับสารมลพิษหลายชนิด เช่น โลหะหนัก ยาฆ่าแมลง แก๊ส รวมถึงสีย้อม หมู่ฟังก์ชันบนผิวของกากตะกอนที่แสดงประจุสามารถดูดซับสารมลพิษชนิดที่มีประจุตรงกันข้ามด้วย electrostatic interaction นั่นคือ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล และหมู่ฟอสโฟเนตที่แสดงประจุลบสามารถเกิดการดูดซับด้วยแรงระหว่างประจุกับสารมลพิษชนิดประจุบวก ส่วนหมู่เอมีนที่แสดงประจุบวกสามารถเกิดการดูดซับด้วยแรงระหว่างประจุกับสารมลพิษชนิดประจุลบได้ รวมถึงบริเวณผิวที่ไม่มีขั้วของกากตะกอนยังสามารถเกิดการดูดซับทางกายภาพกับสารมลพิษอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วได้อีกด้วย

2.6.3 การบำบัดกากตะกอน

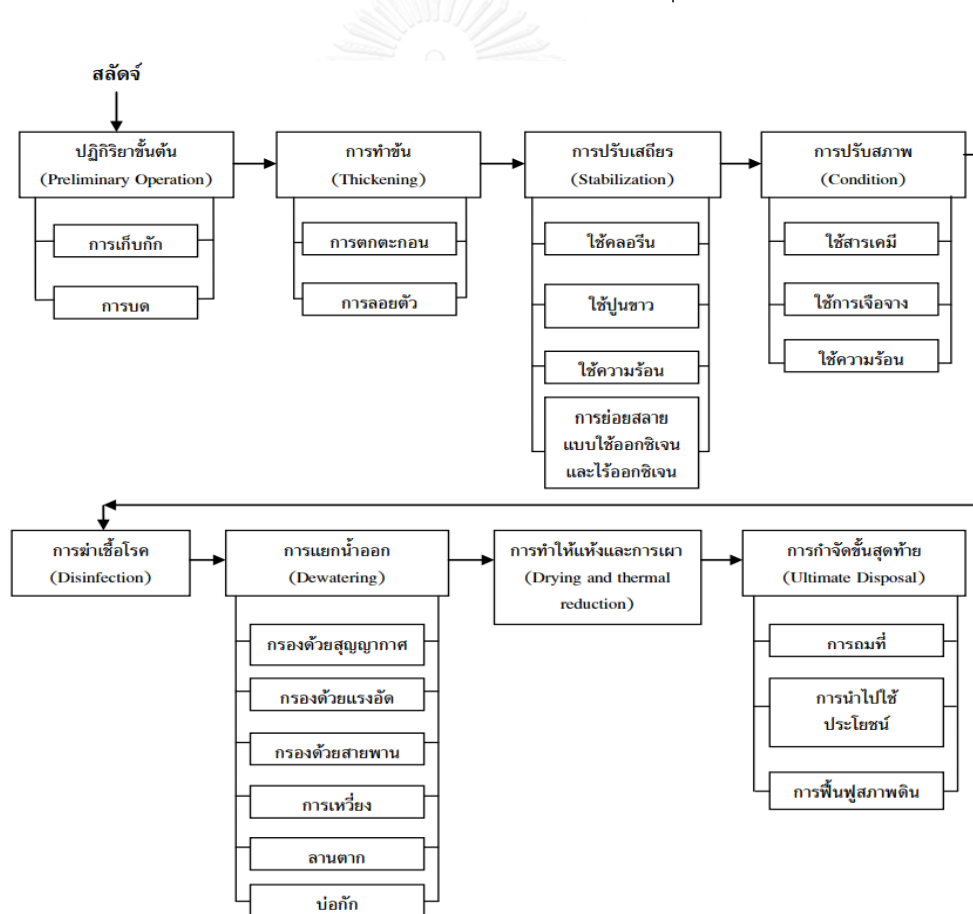
เนื่องจากกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดทางชีวภาพมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นหากปล่อยกากตะกอนไว้อาจทำให้เกิดปัญหาความเน่าเหม็นขึ้น อีกทั้งยังเป็นแหล่งของเชื้อโรค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดกากตะกอนให้มีความคงตัว นอกจากนี้ยังต้องการลดปริมาตรของกากตะกอนลงเพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีและพลังงานในการบำบัด และเพื่อให้สะดวกต่อการขนส่งไปกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อ กระบวนการบำบัดกากตะกอนประกอบด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

1. กระบวนการขั้นต้น (preliminary operation) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้สลัดจ์ที่มีลักษณะที่เหมือนกัน ได้แก่ การแยกกรวดทราย การบดสลัดจ์ การผสม และการกักเก็บ
2. การทำให้ข้น (thickening) เป็นการแยกน้ำออกจากของแข็ง ทำให้ปริมาตรของสลัดจ์ลดลงด้วยกระบวนการตกตะกอน (sedimentation) หรือการใช้เทคนิคการลอยตัว (floatation) หรือการหมุนเหวี่ยง (centrifugation)
3. การปรับเสถียร (stabilization) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาความเน่าเหม็นและปริมาณเชื้อโรคของสลัดจ์ ทำโดยนำสลัดจ์มาทำการย่อยด้วยการใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศ หรือทำการย่อยโดยการใส่สารเคมี เช่น การออกซิไดส์ด้วยคลอรีน เป็นต้น หรืออาจใช้ความร้อนในการปรับเสถียรก็ได้
4. การปรับสภาพ (conditioning) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สลัดจ์มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การนำไปหมักเป็นปุ๋ย เป็นต้น
5. การรีดน้ำ (dewatering) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาตรของสลัดจ์ที่จะถูกขนส่งเพื่อนำไปทิ้งด้วยวิธีการฝังกลบ หรือนำไปเผา หรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยใช้วิธีหรืออุปกรณ์ลดปริมาณน้ำ เช่น เครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filter) เครื่องอัดกรอง (filter press) สายพานรีดน้ำ (belt press) เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) การตากบนลานตาก (drying bed) เป็นต้น

2.6.4 การกำจัดกากตะกอน

หลังจากที่กากตะกอนได้ผ่านกระบวนการที่ทำให้มีความคงตัวแล้ว กากตะกอนจะถูกนำไปทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยวิธีการกำจัดกากตะกอนในปัจจุบัน (ดังรูปที่ 2.4) ได้แก่

1. นำไปทิ้งด้วยวิธีการฝังกลบ (landfill) โดยต้องทำการฝังกลบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสีย คือ ค่าดำเนินการสูง อาจก่อให้เกิดปัญหาความขัดแย้งกับประชาชน รวมถึงหากทำการฝังกลบด้วยวิธีการที่ไม่ถูกต้องจะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา
2. การเผา (incineration) เป็นการนำกากตะกอนที่เกือบแห้งหรือกากตะกอนที่มีความเข้มข้นของกากตะกอนตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไปมาทำการเผาเพื่อลดปริมาตร และนำไปฝังกลบ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสีย คือ ค่าดำเนินการสูง และอาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ
3. การนำไปหมักเป็นปุ๋ย (composting) เนื่องจากกากตะกอนประกอบด้วยธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชหลายชนิด ข้อดีของวิธีการนี้ คือ ค่าดำเนินการต่ำกว่าการฝังกลบและการเผา อย่างไรก็ตาม การใช้กากตะกอนมาทำเป็นปุ๋ยต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อโรคหรือสารพิษอื่นๆ



รูปที่ 2. 4 รูปแบบการจัดการตะกอน (ชาญวิทย์ โมรรรัตน์, 2554)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้เป็นตัวดูดซับสารมลพิษหลายชนิด เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดสารมลพิษที่มีต้นทุนในการบำบัดไม่สูงมากนัก ทั้งยังสามารถดำเนินการได้ด้วยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และยังสามารถกำจัดสารมลพิษที่ทนต่อแสง ความร้อน สารเคมี หรือเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ กากตะกอนเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาศึกษาวิจัย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สามารถดูดซับมลพิษได้หลายชนิด ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำกากตะกอนมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อม โดยสีย้อมแต่ละชนิดมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการดูดซับบนผิวของกากตะกอนได้แตกต่างกัน สีย้อมเบสิกเป็นสีย้อมที่สามารถละลายน้ำและเกิดการแตกตัวกลายเป็นประจุบวก ซึ่งจะถูกดูดซับโดยกากตะกอนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากผิวของกากตะกอนมักประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล หรือหมู่ฟอสโฟเนตที่สามารถเกิด deprotonate กลายเป็นประจุลบ จึงทำให้เกิด electrostatic interaction ระหว่างประจุลบของผิวกากตะกอนกับประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมเบสิก นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการดูดซับทางกายภาพระหว่างส่วนที่ไม่มีขั้วของกากตะกอนและสีย้อมเบสิกได้อีกด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสีย้อมเบสิกแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2. 5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสีย้อมเบสิก

ตัวดูดซับ	สีย้อม	q_m (mg/g)	ผู้วิจัย
Activated sludge	1) Basic blue 47	1) 157.5	Chu and Chen (2002)
	2) Basic red 18	2) 133.9	
	3) Basic violet 3	3) 113.6	
	4) Basic red 29	4) 113.2	
	5) Basic yellow 24	5) 105.6	
	6) Basic blue 54	6) 86.6	
	7) Basic blue 3	7) 36.5	
Lived activated sludge	Maxilon red BL-N	123.2	Basibuyuk and Forster (2003)
Suspended activated sludge	1) Basic red 18	1) 285.70	Gulnaz et al. (2004)
	2) Methylene blue	2) 256.41	

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสี้อมเบสิก (ต่อ)

ตัวดูดซับ	สี้อม	q_m (mg/g)	ผู้วิจัย
Sludge ash	Methylene blue	1.6	Weng and Pan (2006)
Sludge-based activated carbon	Methylene blue	263.2	Li et al. (2011)
Paper mill sewage sludge-based activated carbon	Methylene blue	158.73	Li et al. (2011)
Nitric acid modified sludge	1) Methylene blue 2) Crystal violet 3) Basic fuchsine	1) 86.91 2) 89.74 3) 127.07	Wang and Lin (2011)
Activated sludge	Basic red 29	213.89	Chu et al. (2013)
Anaerobic granular sludge-based biochar	Methylene blue	90.9	Shi et al. (2014)
Municipal sewage sludge biochar	Methylene blue	19.4	Fan et al. (2016)

มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้กากตะกอนเป็นตัวดูดซับสี้อมรีแอกทีฟซึ่งเป็นสี้อมที่มีประจุลบ กากตะกอนมักประกอบด้วยหมู่เอมีนซึ่งสามารถถูก protonate กลายเป็นประจุบวก และเกิดการดูดซับกับสี้อมประจุลบได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2. 6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอนในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ

ตัวดูดซับ	สีย้อม	q_m (mg/g)	ผู้วิจัย
Suspended activated sludge	1) Reactive yellow 2 2) Reactive blue 2	1) 333.3 2) 250.0	Aksu (2001)
Activated sludge	Reactive black 5	116	Gulnaz et al. (2006)
Sludge	Rhodamine-B	7.2	Ju et al. (2008)
Industrial laundry sewage sludge-based activated carbon	Remazol brilliant blue R	33.5	Silva et al. (2016)
1) Physical-chemical sludge 2) Biological sludge	Reactive red 2	1) 213.9 2) 159.3	Sonai et al. (2016)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้นำตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับมลพิษชนิดหนึ่งมาทำการดูดซับมลพิษอีกชนิดหนึ่งโดยไม่ทำการชะมลพิษชนิดแรกออกจากตัวดูดซับ อาจเรียกกระบวนการนี้ว่า secondary adsorption งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ secondary adsorption แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2. 7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแบบ secondary adsorption

ตัวดูดซับ	สีย้อม	q_m (mg/g)	ผู้วิจัย
Carboxymethyl cellulose	ดูดซับชั้นแรก Methylene blue	274.7	Zhang et al. (2011)
	ดูดซับชั้นที่สอง Methyl orange	110.0	

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแบบ secondary adsorption (ต่อ)

ตัวดูดซับ	สีย้อม	q_m (mg/g)	ผู้วิจัย
Opal	ดูดซับขั้นแรก Crystal violet	101.13	Ma et al. (2012)
	ดูดซับขั้นที่สอง Pb^{2+}	20.92	
Cationic surfactant modified straw	ดูดซับขั้นแรก		Zhang et al. (2012)
	1) Methyl orange	1) 338.6	
	2) Acid green 25	2) 1,015	
	ดูดซับขั้นที่สอง		
	Methylene blue	1) 130 2) 110	

จากข้อมูลข้างต้น ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการศึกษากำจัดสีย้อมโดยกระบวนการ secondary adsorption ด้วยกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และเนื่องจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นวัสดุอินทรีย์ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สามารถดูดซับสีย้อมได้หลายชนิด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า โดยปกติผิวของกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะแสดงความเป็นประจุลบ จึงสามารถดูดซับสีย้อมประจุบวกได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์มาใช้ดูดซับสีย้อมเบสิก หลังการดูดซับสีย้อมเบสิกผิวของกากตะกอนน่าจะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยน่าจะแสดงความเป็นประจุบวกมากขึ้น จึงนำตัวดูดซับที่ได้มาทำการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟซึ่งมีประจุลบ ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยอื่น โดยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมดูดซับสีย้อมในขั้นที่สองด้วยการใช้ไอโซเทอร์ม ศึกษาการนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมสองชนิดกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับใหม่ ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม และทำการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.1.1 ศึกษาสมบัติของกากตะกอน
- 3.1.2 หาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบสิกด้วยกากตะกอน
- 3.1.3 หาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิก
- 3.1.4 ศึกษาการนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับ
- 3.1.5 ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟ
- 3.1.6 การทดสอบกับน้ำเสียจริง

3.2 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

ตารางที่ 3. 1 วัสดุอุปกรณ์

เครื่องมือ	ยี่ห้อ/รุ่น
Fourier Transform-Infrared Spectrometer (FT-IR)	NICOLET/6700
Surface area analyzer	BELSORP-mini II
UV-Visible spectrophotometer	AGILENT/8453
Zeta meter	MALVERN/ZPS
เครื่องกวนสาร	GEM/MS101

ตารางที่ 3.1 วัสดุอุปกรณ์ (ต่อ)

เครื่องมือ	ยี่ห้อ/รุ่น
เครื่องเขย่าสาร	JANKE&KUNKEL/HS 500
เครื่องปั่นเหวี่ยง	HETTICH UNIVERSAL/320R
เครื่องมืออบ	
ตะแกรงขนาด 16 และ 60 เมช	
ตู้อบ	MEMMERT/UM500
พีเอชมิเตอร์	METTLER TOLEDO/FE 20-ATC

3.2.2 สารเคมี

ตารางที่ 3. 2 รายการสารเคมี

สารเคมี	บริษัท/เกรด
Ferriin indicator	
Ferrous ammonium sulfate (FAS)	UNIVAR/For analysis
Hydrochloric acid	MERCK/For analysis 37%
Mercuric sulfate	UNIVAR/For analysis
Methylene blue	SIGMA/For microscopy
Nitric acid	MERCK/For analysis 65%
Potassium bromide	MERCK/For IR spectroscopy
Potassium dichromate	CARLO ERBRA/For analysis
Reactive red 22	SUMITOMO
Silver sulfate	POCH/Pure P.A.

ตารางที่ 3.2 รายการสารเคมี (ต่อ)

สารเคมี	บริษัท/เกรด
Sodium chloride	CARLO ERBRA/For analysis
Sodium hydroxide	MERCK/For analysis
Sodium nitrate	CARLO ERBRA/For analysis
Sodium sulfate	MERCK/For analysis
Sulfuric acid	MERCK/For analysis 95-97%

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมกากตะกอน

นำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์ของโรงงานผลิตอาหารสัตว์ที่ผ่านการตากแห้งภายใต้แสงอาทิตย์มาทำการบดและคัดขนาด โดยคัดเลือกกากตะกอนที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 1.19 มิลลิเมตร โดยแยกเฉพาะกากตะกอนที่สามารถผ่านรูกรองของตะแกรงขนาด 16 เมช แต่ไม่สามารถผ่านรูกรองของตะแกรงขนาด 60 เมช

3.3.2 ศึกษาสมบัติของกากตะกอน

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การหาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนผิวของกากตะกอนด้วยเครื่อง FT-IR การศึกษา ค่าศักย์ซีต้า (zeta potential) ด้วยเครื่อง zeta meter การหาค่าพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง surface area analyzer และการหาค่าพีเอชของสารละลายที่ทำให้อนุภาคมีประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH at point of zero charge) ซึ่งทำการศึกษาโดยผสมกากตะกอน 0.200 กรัมโดยน้ำหนักเข้ากับสารละลายโซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 40.0 มิลลิลิตรที่ถูกปรับให้มีค่าพีเอช 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำของผสมไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการวัดค่าพีเอช

หลังการเขย่า และทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นกับผลต่างระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นและค่าพีเอชสุดท้าย (Cardenas-Peña et al., 2012)

3.3.3 หาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน

ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบสิก ได้ใช้สีย้อม methylene blue เป็นตัวแทนสีย้อมเบสิก โดยการนำกากตะกอน 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งมาทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายปริมาตร 40.0 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ในระยะเวลาที่ต้องการ ทำการแยกสารละลายออกจากกากตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร โดยนำสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันมาวัดค่าการดูดกลืนแสง สร้างกราฟมาตรฐานจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมกับค่าการดูดกลืนแสง ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างและนำมาแทนค่าลงในสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสีย้อม

3.3.3.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม methylene blue

ทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปรับพีเอชของสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่า 2, 4, 6, 8 และ 10 นำไปเขย่าเป็นเวลา 180 นาที และวัดค่าพีเอชของสารละลายหลังการดูดซับ ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย methylene blue ที่มีสภาวะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue

ทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.3.1 นำไปเขย่าเป็นเวลา 30, 60, 90, 180 และ 300 นาที ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย methylene blue ที่มีสภาวะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue

ทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 100, 400, 700, 1000, 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.3.1 นำไปเขย่าเป็นเวลา 300 นาที ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย methylene blue ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.3.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue

ทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 100, 150, 200, 400, 600, 900 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.3.1 นำไปเขย่าเป็นเวลา 300 นาที ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย methylene blue ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.4 หาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue

ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ได้ใช้สีย้อม reactive red 22 เป็นตัวแทนของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยในการศึกษาได้นำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue (MB-sludge) มาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยนำตัวดูดซับ 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งมาทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายปริมาตร 40.0 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีตามระยะเวลาที่ต้องการ ทำการแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

3.3.4.1 การเตรียมกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue

นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายสีย้อม methylene blue ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ที่ทำให้เกิดการดูดซับจนเต็มบริเวณ active site ของกากตะกอนจากการทดลองที่ 3.3.3.3 ผสมกากตะกอนกับสารละลายสีย้อมที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.3.1 ในอัตราส่วน 0.100 กรัมต่อ 40.0 มิลลิตรนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 300 นาที แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายแล้วล้างตัวดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออน นำตัวดูดซับที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หากไม่อบและใช้ตัวดูดซับต่อทันทีจะทำให้เกิดการหลุดละลายของสีย้อม methylene blue จำนวนมาก) นำตัวดูดซับที่ได้มาทำการคัดขนาด โดยคัดเลือกตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 1.19 มิลลิเมตร เรียกตัวดูดซับชนิดนี้ว่า MB-sludge

3.3.4.2 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22

นำ MB-sludge และกากตะกอนมาทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปรับพีเอชของสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่า 2, 4, 6, 8 และ 10 นำไปเขย่าเป็นเวลา 180 นาที และวัดค่าพีเอชของสารละลายหลังการดูดซับ ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย reactive red 22 ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟระหว่างกากตะกอนกับกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิก

3.3.4.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22

นำ MB-sludge มาทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 นำไปเขย่าเป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย reactive red 22 ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.4.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22

นำ MB-sludge มาทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 นำไปเขย่าเป็นเวลา 180 นาที ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย reactive red 22 ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22

นำ MB-sludge มาทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 100, 120, 160, 200, 250, 320 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 นำไปเขย่าเป็นเวลา 180 นาที ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย reactive red 22 ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.5 ศึกษาการนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 กลับมาใช้เป็นตัวดูดซับซ้ำ

3.3.5.1 การเตรียมกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22

นำ MB-sludge มาผสมกับสารละลาย reactive red 22 ที่มีความเข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นความเข้มข้นของสีย้อม reactive red 22 ที่ทำให้เกิดการดูดซับจนเต็มบริเวณ active site ของ MB-sludge จากการทดลองที่ 3.3.4.4 ผสม MB-sludge กับสารละลายสีย้อมที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 ในอัตราส่วน 0.100 กรัมต่อ 40.0 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 180 นาที แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายแล้วล้างตัวดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออน นำตัวดูดซับที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวดูดซับที่ได้มาทำการคัดขนาด โดยคัดเลือกตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 1.19 มิลลิเมตร เรียกตัวดูดซับชนิดนี้ว่า RR-MB-sludge

3.3.5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนและกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับ methylene blue และสีย้อม reactive red 22

นำกากตะกอนและ RR-MB-sludge 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งมาทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 200, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40.0 มิลลิลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 300 นาที ทำการแยกสารละลายออกจากกากตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลาย methylene blue ที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบสิกระหว่างกากตะกอนกับ RR-MB-sludge

3.3.6 ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22

นำกากตะกอน 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งมาทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.3.1 และมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เข้มข้น 0, 0.0035 และ 0.018 โมลาร์ ปริมาตร 40.0 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 300 นาที ทำการแยกสารละลายออกจากกากตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

นำ MB-sludge 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งมาทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 และมีเกลือ NaCl หรือ Na_2SO_4 เข้มข้น 0, 0.05, 0.2 และ 0.35 โมลาร์ ปริมาตร 40.0 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 180 นาที ทำการแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมคือ สารละลายสีย้อมที่มีสถานะเช่นเดียวกับข้างต้น

3.3.7 การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

ในการทดลองดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยกากตะกอน ทำการเตรียมน้ำเสียด้วยการนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกของแข็งออกจากน้ำเสีย นำกากตะกอนและ MB-sludge 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งมาทำการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียปริมาตร 40.0 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 180 นาที ทำการแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายที่ได้มาทำการวิเคราะห์ค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ตามวิธีการของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไพฑูรย์ หมายถึง มั่นสมสุข) ทำการเปรียบเทียบค่า COD ของน้ำเสียตั้งต้นกับน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับ

สำหรับการดูดซับโดยใช้กากตะกอน นำกากตะกอนมาผสมกับน้ำเสียที่ถูกปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 นำไปเขย่า จากนั้นทำการแยกกากตะกอนออกจากสารละลายและนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ค่า COD ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ

สำหรับการดูดซับโดยใช้ MB-sludge ใช้ MB-sludge ที่ได้จากการผสมกากตะกอนกับสารละลายสีย้อม methylene blue ที่มีเกลือ Na_2SO_4 เข้มข้น 0.018 โมลาร์ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดของเกลือที่ใช้ในการทดลอง 3.3.6 นำ MB-sludge ที่ได้มาผสมกับน้ำเสียที่ถูกปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งได้จาก 3.3.4.2 นำไปเขย่า จากนั้นทำการแยก MB-sludge ออกจากสารละลายและนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ค่า COD ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ

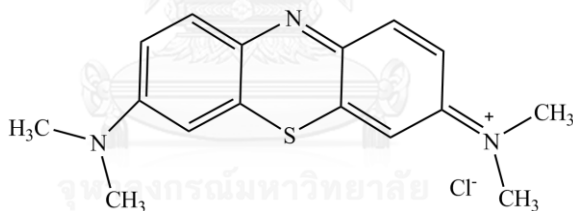
3.3.8 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

1. ค่าเฉลี่ย (mean) แสดงถึงค่าที่เป็นตัวแทนของข้อมูล
2. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) แสดงถึงการกระจายของข้อมูล
3. F-test ใช้เปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของกลุ่มผลการทดลอง 2 กลุ่มก่อนการทดสอบ T-test
4. T-test ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มผลการทดลอง 2 กลุ่ม
5. Analysis of variance (ANOVA) ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มผลการทดลองมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป
6. Pearson's correlation เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตามสมการเส้นตรงของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม

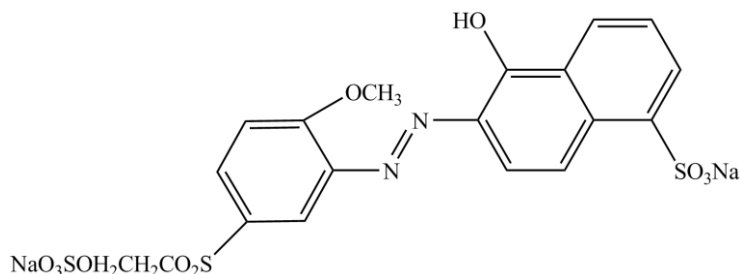
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนจากระบบการบำบัดน้ำเสีย โดยเลือกใช้สีย้อม methylene blue (รูปที่ 4.1) และสีย้อม reactive red 22 (รูปที่ 4.2) ในการศึกษา โดยนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์มาศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี จากนั้นจึงนำกากตะกอนมาใช้ดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลาย ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน จากนั้นจึงนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue มาใช้ดูดซับสีย้อม reactive red 22 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge นอกจากนี้เนื่องจากในระบบการฟอกย้อมสิ่งทอมักจะมีการใช้เกลือปริมาณมาก จึงทำการศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 และทำการทดสอบการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ



รูปที่ 4. 1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม methylene blue



รูปที่ 4. 2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม reactive red 22

การศึกษาการกำจัดสีของเบสิกและสีอมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการกำจัดและค่าความจุของการดูดซับ สูตรการคำนวณแสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

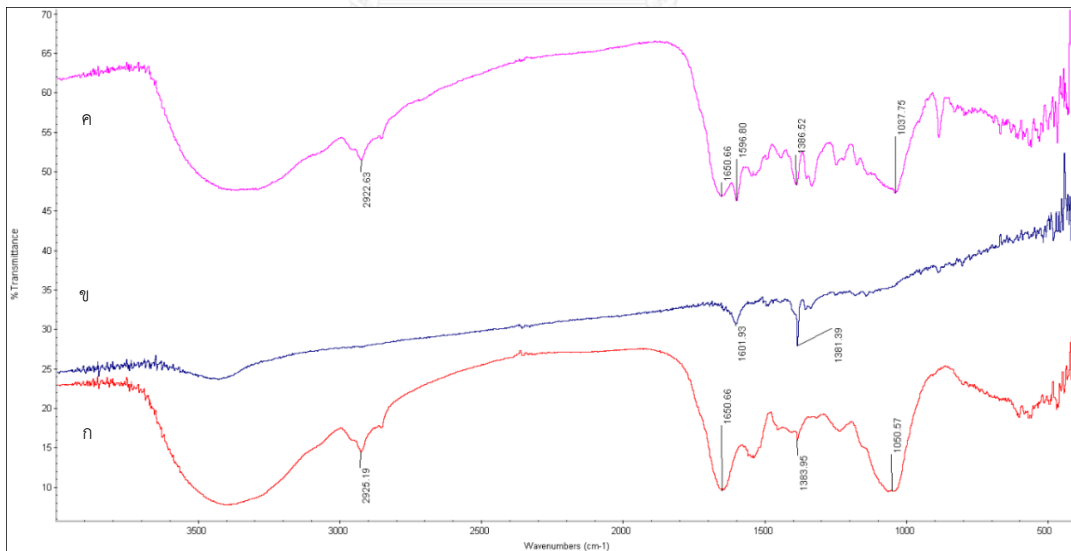
$$\% \text{removal} = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

$$q = \frac{(C_0 - C)}{m} \times V \quad (4.2)$$

โดย q = น้ำหนักของสี้อมที่ถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_0 และ C = ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายของสี้อม (mg/L)
 m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)
 V = ปริมาตรของสารละลาย (L)

4.1 การศึกษาสมบัติของกากตะกอน

4.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

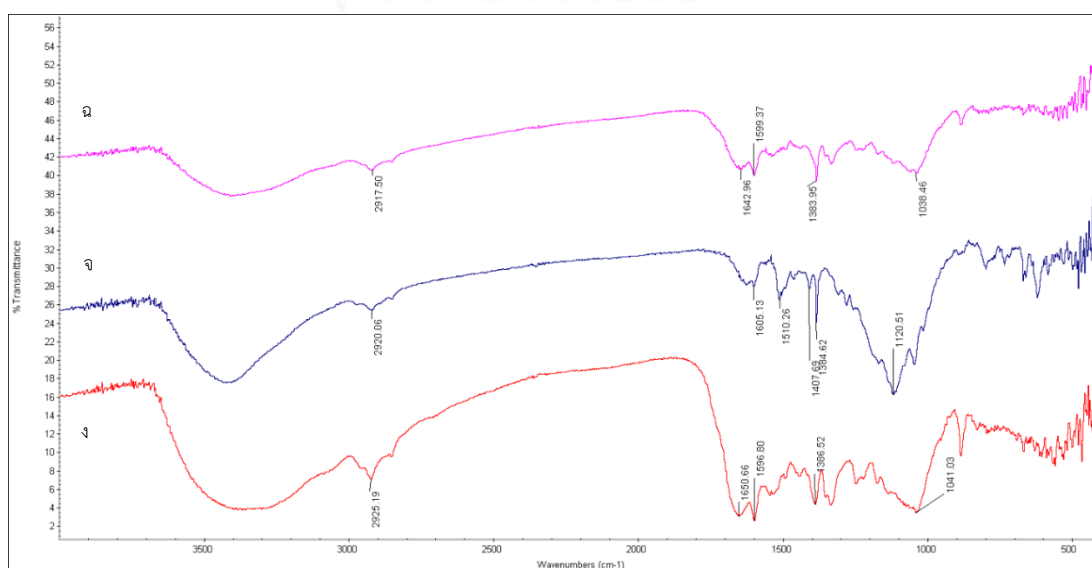


รูปที่ 4.3 FT-IR spectrum ของกากตะกอน (ก) methylene blue (ข) และ MB-sludge (ค)

FT-IR spectrum ของกากตะกอนแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) สัญญาณในช่วง 3,200 ถึง 3,500 cm^{-1} และ 1,051 cm^{-1} แสดงถึง O—H stretching และ C—O stretching ของแอลกอฮอล์ (alcohol) ตามลำดับ สัญญาณในช่วง 2,925 cm^{-1} แสดงถึง C—H stretching ของอัลคิล (alkyl) ส่วนสัญญาณในช่วง 1,651 cm^{-1} แสดงถึง N—H bending ของหมู่เอมีนปฐมภูมิ (primary amine) และสัญญาณในช่วง 1,384 cm^{-1} แสดงถึง C—H bending ของเมทิล (methyl) จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ผิวกากตะกอนมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้ว เช่น หมู่แอลกอฮอล์และหมู่เอมีน และส่วนไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว

FT-IR spectrum ของสีย้อม methylene blue แสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) สัญญาณในช่วง 1,602 cm^{-1} แสดงถึง C=C stretching ของวงเบนซีน (benzene ring) สัญญาณในช่วง 1,381 cm^{-1} C—H แสดงถึง bending ของเมทิล และสัญญาณในช่วง 3,500 cm^{-1} แสดงถึง N—H stretching ของหมู่เอมีน

FT-IR spectrum ของกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue (MB-sludge) แสดงดังรูปที่ 4.3 (ค) พบสัญญาณเหมือนกันกับสัญญาณที่ตรวจพบในกากตะกอน และมีสัญญาณในช่วง 1,597 cm^{-1} ปรากฏขึ้นนอกเหนือจากค่าสัญญาณของกากตะกอน โดยสัญญาณดังกล่าวแสดงถึง C=C stretching ของวงเบนซีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสีย้อม methylene blue นอกจากนี้ สัญญาณในช่วง 1,051 cm^{-1} ของกากตะกอนเลื่อนไปที่ 1,038 cm^{-1} อาจสรุปได้ว่า หมู่ไฮดรอกซิล (O—H) มีส่วนเกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อม methylene blue และแสดงให้เห็นว่า สีย้อม methylene blue เกิดการดูดซับบน MB-sludge



รูปที่ 4. 4 FT-IR spectrum ของ MB-sludge (ง) reactive red 22 (จ) และ RR-MB-sludge (ฉ)

จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของ MB-sludge หลังการนำไปดูดซับ สีย้อม reactive red 22 (RR-MB-sludge) เปรียบเทียบกับก่อนทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 แสดงดังรูปที่ 4.4

FT-IR spectrum ของสีย้อม reactive red 22 (รูปที่ 4.4 (จ)) สัญญาณในช่วง 3,200 ถึง 3,500 cm^{-1} แสดงถึง O—H stretching ของแอลกอฮอล์ สัญญาณในช่วง 2,925 cm^{-1} แสดงถึง C—H stretching ของอัลคิล สัญญาณในช่วง 1,510 cm^{-1} และ 1,605 cm^{-1} แสดงถึง C=C stretching ของวงเบนซีน สัญญาณในช่วง 1,385 cm^{-1} และ 1,408 cm^{-1} แสดงถึง C—H bending ของเมทิล และสัญญาณในช่วง 1,121 cm^{-1} แสดงถึง O—H stretching ของแอลกอฮอล์

FT-IR spectrum ของ RR-MB-sludge (รูปที่ 4.4 (ฉ)) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ MB-sludge และสเปกตรัมของสีย้อม reactive red 22 พบว่า สัญญาณของทั้ง 3 สเปกตรัมมีความคล้ายคลึงกัน จึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่า เกิดการดูดซับสีย้อม reactive red 22 บนผิวของ RR-MB-sludge หรือไม่และเกิดขึ้นอย่างไร

4.1.2 การศึกษาค่าศักย์ซีต้า

การศึกษาค่าศักย์ซีต้า (zeta potential) เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นประจุของผิวของแข็ง รวมถึงชนิดของประจุโดยรวมบนผิวของของแข็ง ซึ่งหาได้โดยศึกษาความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นของไอออนที่อยู่บนผิวของแข็งกับประจุในของเหลว ค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอน MB-sludge และ RR-MB-sludge แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 ค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอน MB-sludge และ RR-MBsludge

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่าศักย์ซีต้า (mV)
กากตะกอน	-19.73 ± 0.55
MB-sludge	-10.83 ± 0.25
RR-MB-sludge	-23.57 ± 0.74

กากตะกอนมีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับ -19.73 mV แสดงให้เห็นว่า ผิวของกากตะกอน แสดงความเป็นประจุลบ อาจเกิดจากการแตกตัวของหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอน ซึ่งจะช่วยให้สามารถดูดซับสารที่มีประจุบวกได้ดี จึงเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้กากตะกอนในการดูดซับสีย้อม methylene blue ที่มีประจุบวกได้ดีกว่าสีย้อม reactive red 22 ที่มีประจุลบ หลังการนำกากตะกอนมาดูดซับสีย้อม methylene blue พบว่า ค่าศักย์ซีต้าของ MB-sludge มีค่าเท่ากับ -10.83 mV ผลการทดลองบ่งชี้ว่า หลังการดูดซับสีย้อม methylene blue ซึ่งมีประจุบวกจะส่งผลให้ความเป็นประจุลบของผิวกากตะกอนลดลง เนื่องจากสีย้อม methylene blue เกิดการดูดซับบนหมู่แอคทีฟที่มีประจุลบ ทำให้ไม่แสดงความเป็นประจุลบได้อีก ซึ่งเมื่อผิวของ MB-sludge มีความเป็นลบน้อยลง จึงอาจคาดการณ์ได้ว่า MB-sludge น่าจะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ซึ่งมีประจุลบได้ดีกว่าการใช้กากตะกอน

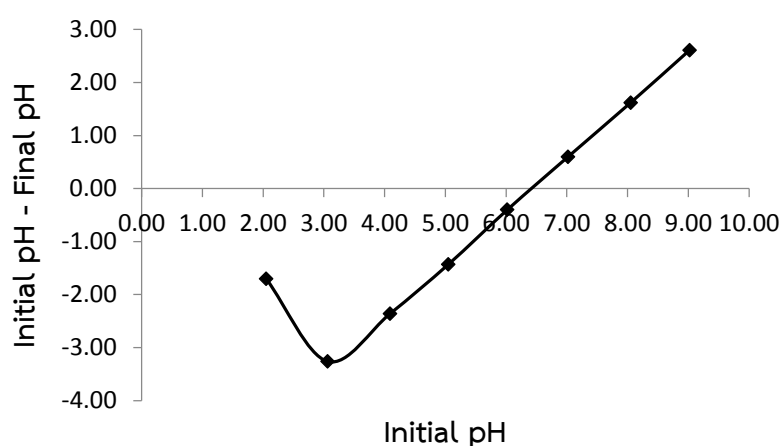
เมื่อนำ MB-sludge ไปทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 และนำตัวดูดซับ RR-MB-sludge ไปวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า พบว่ามีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับ -23.57 mV ซึ่งมีค่าเป็นลบมากกว่าค่าศักย์ซีต้าของ MB-sludge แสดงให้เห็นว่าสีย้อม reactive red 22 เกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้ และส่งผลให้ความเป็นประจุลบของผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น

4.1.3 การศึกษาค่าพื้นที่ผิว

การศึกษาค่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้งสามชนิดในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของกากตะกอนเมื่อเกิดการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิด แต่จากการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและ BET method พบว่า ไม่สามารถนำผลการทดลองมาสร้างกราฟตามสมการเส้นตรงของ BET method และหาค่าพื้นที่ผิวได้ เนื่องจากตัวดูดซับไม่ดูดซับแก๊สไนโตรเจน นั่นคือ ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนหรือเป็น non-porous material นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการปรับสภาพผิวของกากตะกอน จึงเป็นไปได้ว่าเมื่อนำกากตะกอนมาใช้ดูดซับสีย้อม การดูดซับจะเกิดบริเวณผิวชั้นนอกของกากตะกอน

4.1.4 การศึกษาพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์

การศึกษาพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) คือการหาค่าพีเอชของสารละลายที่ทำให้ประจุรวมบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นการบ่งบอกพฤติกรรมการแสดงประจุบนผิวของภาคตะกอนเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน โดยเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่าค่า pH_{pzc} ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุรวมบนผิวของของแข็งมีค่าเป็นบวก ส่วนสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงกว่าค่า pH_{pzc} ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุรวมบนผิวของของแข็งมีค่าเป็นลบ ซึ่งชนิดและความเป็นประจุบนผิวของภาคตะกอนจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม ผลการพล็อตกราฟระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นกับผลต่างระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นและค่าพีเอชสุดท้ายแสดงดังรูปที่ 4.5 จากผลการทดลอง pH_{pzc} ของภาคตะกอนมีค่าเท่ากับ 6.4 ดังนั้น ผิวของภาคตะกอนแสดงประจุรวมเป็นบวกเมื่อภาคตะกอนอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.4 ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) และเป็นลบเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 6.4 ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) ซึ่งเมื่อพิจารณาควบคู่กับผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า หมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้ว ได้แก่ หมู่แอลกอฮอล์และหมู่เอมีน ซึ่งหมู่แอลกอฮอล์จะถูก deprotonate และแสดงความเป็นประจุลบที่พีเอชสูงกว่า 6.4 ในขณะที่หมู่เอมีนจะถูก protonate และแสดงความเป็นประจุบวกที่พีเอชต่ำกว่า 6.4



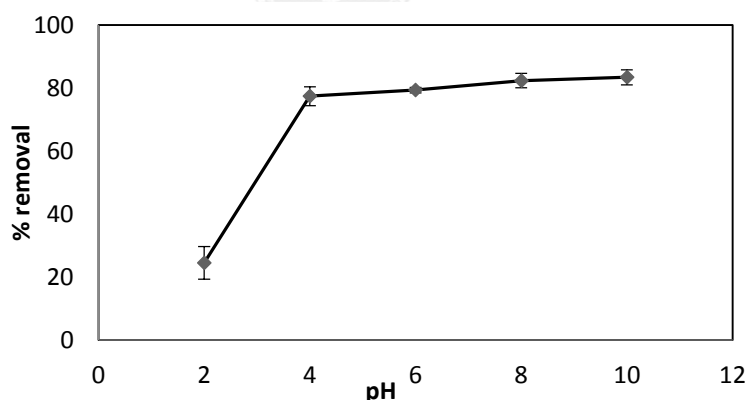
รูปที่ 4.5 กราฟการหาพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของภาคตะกอน

4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนประกอบไปด้วยการศึกษาผลของค่าพีเอช ผลของระยะเวลาสัมผัส ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยไอโซเทอร์ม มีผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม methylene blue

พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยค่าพีเอชที่แตกต่างกันจะส่งผลให้สมบัติของตัวดูดซับและสารละลายเปลี่ยนแปลงไป จากการศึกษาค่า pH_{pzc} เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.4 ประจุรวมบนผิวของกากตะกอนมีค่าเป็นบวก และมีค่าเป็นลบ เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงกว่า 6.4 นอกจากนี้ สีย้อม methylene blue เกิดการแตกตัวแสดงประจุบวกในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำ โดยศึกษาการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอช 2 ถึง 10 ด้วยกากตะกอน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4. 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนที่พีเอชต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม methylene blue จากพีเอช 2 ถึงพีเอช 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมด้วยกากตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 24% เป็น 79% และการเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายจากพีเอช 4 ถึงพีเอช 10 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 79% เป็น 83% เนื่องจากในสารละลายที่มีพีเอชต่ำหรือในสารละลายที่เป็นกรดแก่ หมู่เอมีนบนผิวของกากตะกอนเกิดการ protonation ทำให้ผิวของกากตะกอนมีประจุบวกและเกิดแรงผลัก

(repulsive force) กับประจุบวกของสีย้อม methylene blue ส่วนหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอนจะอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ ทำให้ไม่เกิดการดูดซับกับสีย้อมด้วย electrostatic interaction เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอนเกิดการ deprotonation และแสดงประจุลบ ทำให้สามารถดูดซับสีย้อม methylene blue ได้ผ่าน electrostatic interaction ส่วนหมู่เอมีนบนผิวของกากตะกอนไม่ถูก protonate ทำให้อยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ จึงไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดแรงผลักรับกับสีย้อม (Gulnaz et al., 2004)

เมื่อพิจารณาควบคู่กับ pH_{pzc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.4 พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับชนิดของประจุบนผิวของกากตะกอน ประจุมบนผิวของกากตะกอนจะมีค่าเป็นบวกเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.4 ($pH < pH_{pzc}$) และในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 6.4 ($pH > pH_{pzc}$) ประจุมบนผิวของกากตะกอนมีค่าเป็นลบ จากการวัดค่าพีเอชของสารละลายก่อนและหลังการดูดซับดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า พีเอชหลังการดูดซับของสารละลายที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 2 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการ protonate หมู่เอมีนบนผิวของกากตะกอน ทำให้จำนวนโปรตอนในสารละลายลดลง และส่งผลให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าพีเอชทั้งก่อนและหลังการดูดซับมีค่าต่ำกว่าค่า pH_{pzc} ดังนั้นประจุมบนผิวของกากตะกอนมีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการผลักรับกับสีย้อม methylene blue ประสิทธิภาพการกำจัดจึงมีค่าต่ำกว่าที่พีเอชอื่นๆ ในขณะที่พีเอชหลังการดูดซับของสารละลายที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4 ถึง 6 มีค่าอยู่ในช่วง 5.9 ถึง 6.1 ซึ่งต่ำกว่าค่า pH_{pzc} แสดงให้เห็นว่า ประจุมบนผิวของกากตะกอนมีค่าเป็นบวก อย่างไรก็ตาม หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอนบางส่วนเกิด deprotonate ทำให้ผิวของกากตะกอนบางส่วนมีประจุลบ และทำให้เกิดการดูดซับสีย้อม methylene blue ได้ด้วย electrostatic interaction ส่วนสารละลายที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8 ถึง 10 ค่าพีเอชหลังการดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการ deprotonate ของหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอน ทำให้จำนวนโปรตอนในสารละลายเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าพีเอชของสารละลายลดลง เนื่องจากค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ 8 ถึง 10 มีค่าสูงกว่าค่า pH_{pzc} ดังนั้นประจุมบนผิวของกากตะกอนมีค่าเป็นลบ ทำให้เกิดการดูดซับสีย้อม methylene blue ได้ดี

จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในสารละลายที่มีพีเอช 4 ถึงพีเอช 10 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 และเนื่องด้วยในกระบวนการพอกย้อมสิ่งทอด้วยสีย้อมเบสิก มักทำการปรับค่าพีเอชของน้ำย้อมให้มีค่าอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 6.0 (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545) ดังนั้นอาจไม่จำเป็นต้องปรับค่าพีเอชของน้ำเสียก่อนการกำจัดสีย้อม methylene blue ด้วยการดูดซับด้วยกากตะกอน

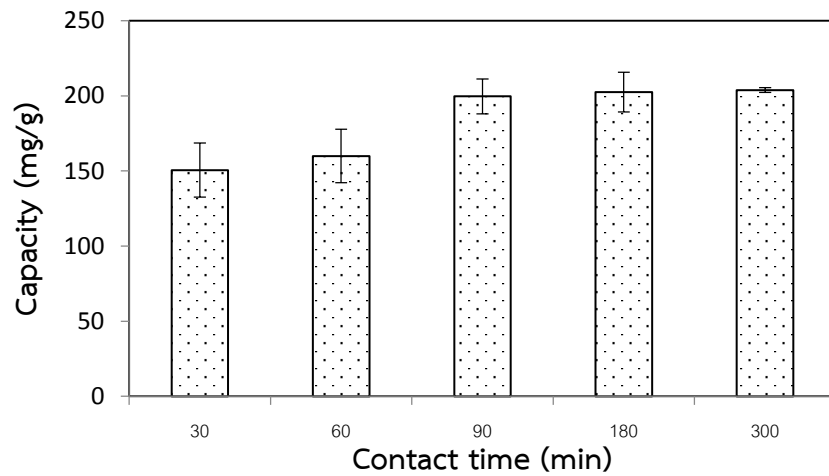
ตารางที่ 4. 2 ค่าพีเอชก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม methylene blue

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชหลังการดูดซับ
2.0	2.27 ± 0.08
4.0	5.86 ± 0.04
6.0	6.13 ± 0.01
8.0	6.37 ± 0.03
10.0	6.70 ± 0.10

4.2.2 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue

จากการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue เข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่มีค่าพีเอช 4 ด้วยกากตะกอนในช่วงเวลา 30, 60, 90, 180 และ 300 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7

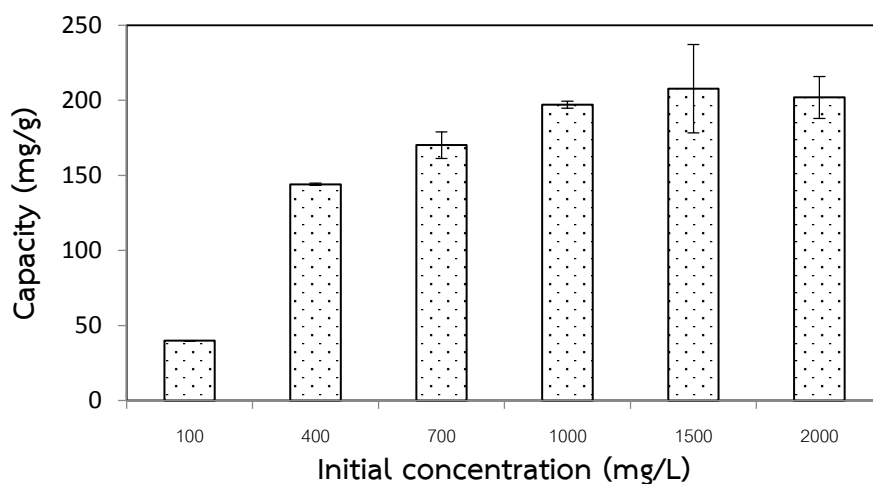
จากผลการทดลองพบว่า ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 151 ถึง 199 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมพัทธ์จาก 30 ถึง 90 นาที จากนั้นค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 204 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมพัทธ์เป็น 300 นาที และจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าความจุของการดูดซับที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ตั้งแต่ 90 ถึง 300 นาที จึงสรุปได้ว่า ภายใต้ภาวะการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนเข้าสู่สมดุลตั้งแต่ 90 นาทีขึ้นไป



รูปที่ 4. 7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน

4.2.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและไอโซเทอรั่มของการดูดซับสีย้อม methylene blue

ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue ในสารละลายเข้มข้น 100, 400, 700, 1000, 1500, 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอช 4 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วยกากตะกอน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8



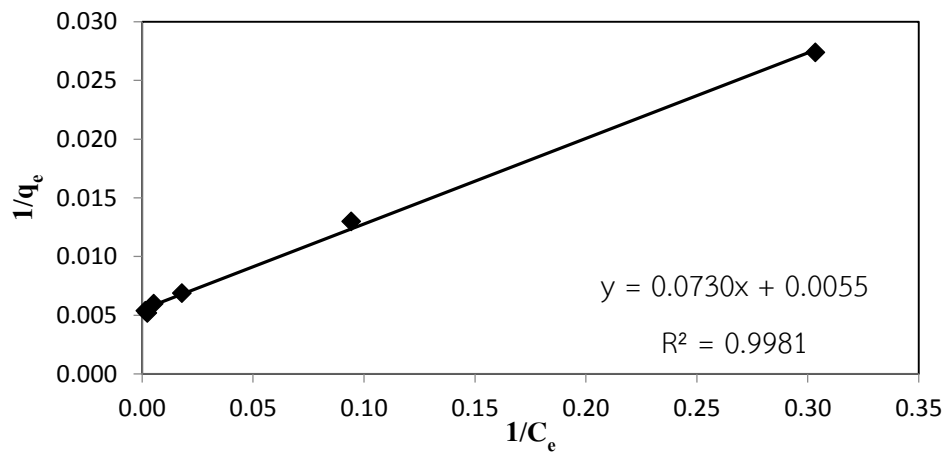
รูปที่ 4. 8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue ต่อความจุของการดูดซับ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue เพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะมี driving force อันเนื่องมาจากความต่างของความเข้มข้นของสารในสารละลายและบนผิวของตัวดูดซับที่มากกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยในสารละลายที่มีสีย้อม methylene blue เข้มข้นสูงมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ในสารละลายกับบนผิวของกากตะกอนที่มากกว่า ทำให้เกิดการแพร่ของสีย้อม methylene blue จากสารละลายมายังผิวของกากตะกอนได้มาก ดังนั้นจึงเกิดการดูดซับสีย้อม methylene blue บนผิวของกากตะกอนได้มากกว่าในสารละลายที่มีสีย้อม methylene blue เข้มข้นต่ำ (Gulnaz et al., 2004) ค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 197 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 100 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 197 ถึง 208 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 1,000 ถึง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าความจุของการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 ถึง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงสรุปได้ว่า เกิดการดูดซับสีย้อม methylene blue จนเต็มบริเวณ active site บนผิวของกากตะกอนเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue ตั้งแต่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป โดยมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับจากการทดลองประมาณ 197 มิลลิกรัมต่อกรัม

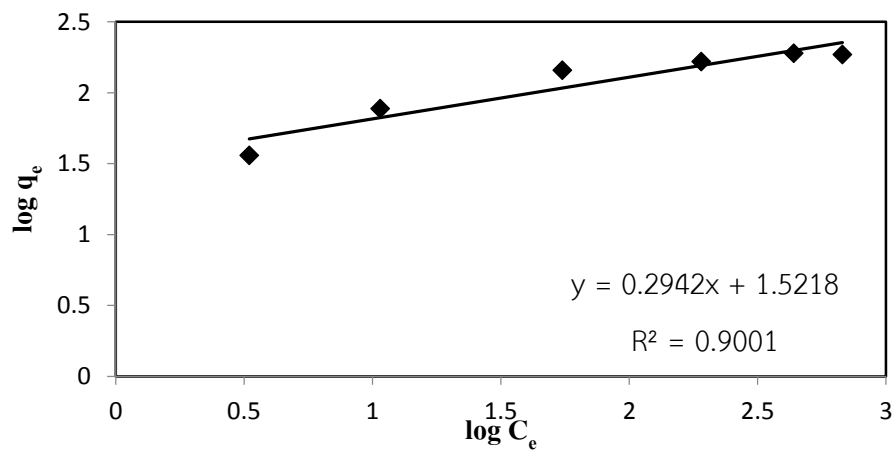
จากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อม methylene blue โดยนำผลการทดลองมาสร้างไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน โดยใช้สมการเส้นตรงของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ผลแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 และทำการคำนวณค่า q_m และ b ได้จากจุดตัดแกน y และความชันของสมการเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ส่วนค่า k และ n สามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกน y และความชันของสมการเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.3

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m b} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (4.3)$$

$$\log q_e = \log k + \left(\frac{1}{n} \right) C_e \quad (4.4)$$



รูปที่ 4. 9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนตามแบบจำลอง แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม



รูปที่ 4. 10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนตามแบบจำลอง ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสี้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน

ไอโซเทอร์ม	สมการเส้นตรง	r^2	q_m (mg/g)	b (L/mg)
แลงเมียร์	$y = 0.0730x + 0.0055$	0.9981	181.79	0.08

ไอโซเทอร์ม	สมการเส้นตรง	r^2	n	K (L/g)
ฟรอนด์ลิช	$y = 0.2942x + 1.5218$	0.9001	3.40	33.25

จากการนำผลการทดลองมาสร้างกราฟตามสมการเส้นตรงของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสี้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนเป็นไปตามความสัมพันธ์ของแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์มมากกว่าแบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม โดยสังเกตจากค่า coefficient of determination (r^2) ที่สูงกว่า โดย r^2 ของแลงเมียร์มีค่าประมาณ 0.99 จึงอาจสรุปได้ว่า พฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมมติฐานของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม นั่นคือ แต่ละตำแหน่งแอคทีฟของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 1 โมเลกุลหรือไอออน การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวและสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยมีค่าคงที่ของ Langmuir เท่ากับ 0.08 L/mg ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับคำนวณได้จากไอโซเทอร์มเท่ากับ 182 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุสูงสุดของการดูดซับจากการทดลอง (192 มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นการยืนยันว่าแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์มนั้นใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นในการทดลองจริงได้ดี

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.4 ค่าความจุของการดูดซับสี้อม methylene blue จากการทดลอง (q_{exp}) และค่าที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (q_L) และไอโซเทอร์มของฟรอนด์ลิช (q_F)

q_{exp} (mg/g)	q_L (mg/g)	q_F (mg/g)
36.45 ± 0.03	36.17 ± 0.76	47.29 ± 0.37
76.83 ± 0.35	80.75 ± 3.77	66.81 ± 1.64
144.46 ± 1.94	146.76 ± 2.46	108.07 ± 2.78
166.32 ± 4.82	170.08 ± 0.68	155.80 ± 2.86
191.87 ± 2.36	176.43 ± 0.07	198.83 ± 0.79
185.33 ± 7.33	178.27 ± 0.09	226.14 ± 1.80

จากการเปรียบเทียบค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue จากการทดลองกับค่าที่ทำนายจากไอโซเทอร์มดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความจุของการดูดซับจากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากการใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียงกัน และจากการคำนวณค่า average percentage error ตามสมการที่ 4.5 พบว่าค่า average percentage error ของค่าที่คำนวณได้จากสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์เทียบกับค่าจริงมีค่าน้อยกว่าฟรอนด์ลิช โดยมีค่าเท่ากับ 3.6% และ 16.7% ตามลำดับ จึงยืนยันได้ว่าแลงเมียร์ไอโซเทอร์มใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อม methylene blue ที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม

$$\varepsilon (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N |[(q_e, i)_{cal} - (q_e, i)_{exp}] / (q_e, i)_{exp}|}{N} \times 100 \quad (4.5)$$

โดย N = จำนวนการตรวจวัด

ตารางที่ 4. 5 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

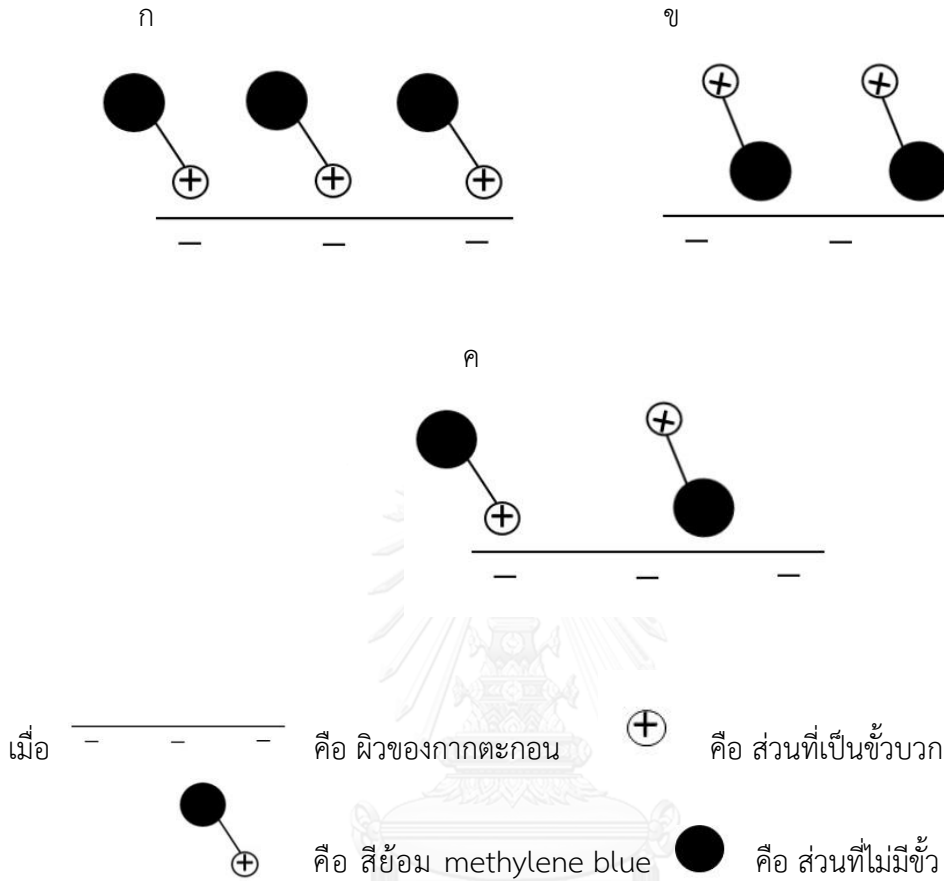
ตัวดูดซับ	q_m (mg/g)	ผู้วิจัย
Sludge-based activated carbon	263.2	Li et al. (2011)
Suspended activated sludge	256.4	Gulnaz et al. (2004)
Sludge	181.8	งานวิจัยนี้
Paper mill sewage sludge-based activated carbon	158.73	W. Li et al. (2011)
Anaerobic granular sludge-based biochar	90.9	Shi et al. (2014)
Nitric acid modified sludge	86.9	Wang and Lin (2011)
Municipal sewage sludge biochar	19.4	Fan et al. (2016)
Sludge ash	1.6	Weng and Pan (2006)

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุสูงสุดของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนในงานวิจัยนี้กับกากตะกอนในงานวิจัยอื่นแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า กากตะกอนจากงานวิจัยนี้สามารถกำจัดสีย้อม methylene blue ได้ดีกว่ากากตะกอนหลายชนิด แต่ยังมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับต่ำกว่างานวิจัยของ Li et al. (2011) เนื่องจาก sludge-based activated carbon มีพื้นที่ผิวสูง จึงดูดซับสีย้อมได้ดีกว่ากากตะกอนของงานวิจัยนี้ ส่วนในงานวิจัยของ Gulnaz et al. (2004) ได้นำกากตะกอนไปแช่ในน้ำกลั่นก่อนการใช้งาน เมื่อนำตัวดูดซับชนิดนี้มาดูดซับสีย้อม อาจทำให้สีย้อมเกิดการเคลื่อนที่เข้าหาผิวของตัวดูดซับได้ดีขึ้น ทั้งนี้ค่าความจุของการดูดซับที่แตกต่างกันขึ้นกับสมบัติของกากตะกอนและปริมาณกากตะกอนต่อปริมาตรสารละลายที่ใช้

4.2.4 กลไกการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน

จากผลการศึกษาสมบัติของกากตะกอนและการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนพบว่า ผิวของกากตะกอนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้ว ซึ่งได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอมีน และประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว การดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนอาจเกิดจาก 3 กระบวนการ ได้แก่

1. Electrostatic interaction ระหว่างประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอนกับประจุบวกของสีย้อม methylene blue ทำให้กากตะกอนแสดงความเป็นประจุลบน้อยลง (รูปที่ 4.11 (ก))
2. การดูดซับทางกายภาพระหว่างบริเวณไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วของผิวกากตะกอนกับสีย้อม methylene blue ส่งผลให้มีประจุบวกบนผิวของกากตะกอนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.11 (ข)) และ 3. เกิดการดูดซับด้วย electrostatic interaction และการดูดซับทางกายภาพ (รูปที่ 4.11 (ค)) ซึ่งกลไกการดูดซับทั้ง 3 กระบวนการให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาค่าศักย์ซีต้าของ MB-sludge ที่เป็นลบน้อยลงเมื่อเทียบกับกากตะกอน และพฤติกรรมการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนเกิดขึ้นแบบขั้นเดียว โดยแต่ละตำแหน่งของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 1 โมเลกุลหรือไอออน และสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้



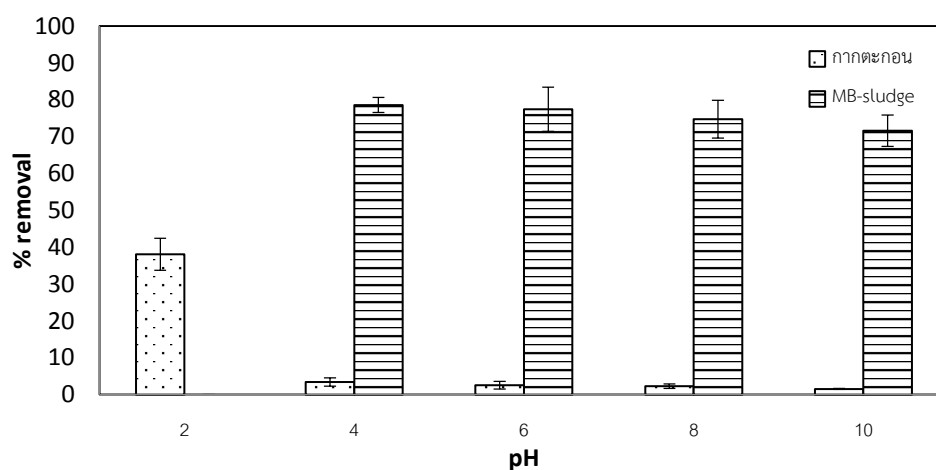
รูปที่ 4. 11 กลไกการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน

4.3 การศึกษาสภาวะในการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue

ในการศึกษานี้เป็นการหาแนวโน้มการนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิกไปใช้งานต่อในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ เริ่มจากการเตรียม MB-sludge นำกากตะกอนมาดูดซับสีย้อม methylene blue ให้มีปริมาณ methylene blue บนกากตะกอนใกล้เคียงกับค่าความจุสูงสุดของการดูดซับของกากตะกอน หรือประมาณใกล้เคียงกับ 182 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วยการศึกษาผลของค่าพีเอช ผลของระยะเวลาสัมผัส ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยไอโซเทอร์ม โดยมีผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22

ทำการดูดซับสีย้อม reactive red 22 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอช 2 ถึง 10 ด้วย MB-sludge และกากตะกอน ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4. 12 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนลดลงเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟและหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นประจุลบ และเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบของสีย้อมกับประจุลบบนผิวของกากตะกอน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง สำหรับที่พีเอชต่ำๆ สีย้อมรีแอกทีฟจะไม่เกิดการแตกตัว และสามารถเกิดการดูดซับอยู่บนผิวของกากตะกอนได้ ดังนั้น ที่พีเอช 2 จึงเป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มค่าพีเอชจาก 2 ถึง 10 ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจาก 38% เป็น 2%

สำหรับการใช้ MB-sludge ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม reactive red 22 ลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 10 โดยประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าอยู่ในช่วง 71% ถึง 78% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการผลักกันระหว่างประจุลบของสีย้อมกับประจุลบที่มีมากขึ้นบนผิวของ MB-sludge เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดย MB-sludge สามารถกำจัดสีย้อม reactive red 22 ในช่วงพีเอช 4 ถึง 10 ได้ดีกว่าการใช้กากตะกอน ซึ่งเมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับผลการศึกษาค่าศักย์ซีต้าของ MB-sludge สีย้อม methylene blue ที่ถูกดูดซับอยู่บน MB-sludge

ส่งผลให้ผิวของตัวดูดซับแสดงความเป็นประจุลบน้อยลง ทำให้สีย้อม reactive red 22 สามารถเข้าใกล้ผิวของตัวดูดซับและเกิดการดูดซับได้มากยิ่งขึ้น สำหรับที่พีเอช 2 ตรวจพบการหลุดของสีย้อม methylene blue ออกจากผิวของ MB-sludge เป็นจำนวนมาก อาจเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของกากตะกอนที่ดูดซับสีย้อม methylene blue อยู่ถูก protonate โดยโปรตอนจากสารละลาย ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดการดูดซับกับประจุของสีย้อม methylene blue

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมด้วยกากตะกอนและ MB-sludge พบว่า MB-sludge มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม reactive red 22 ดีกว่ากากตะกอน เนื่องจากกากตะกอนมีค่าศักย์ซีต้าเป็นลบมากกว่า MB-sludge จึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบกับสีย้อมมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม reactive red 22 ด้วยกากตะกอนมีค่าต่ำกว่าการใช้ MB-sludge โดยค่าพีเอชหลังการดูดซับสีย้อม reactive red 22 แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4. 6 ค่าพีเอชก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม reactive red 22

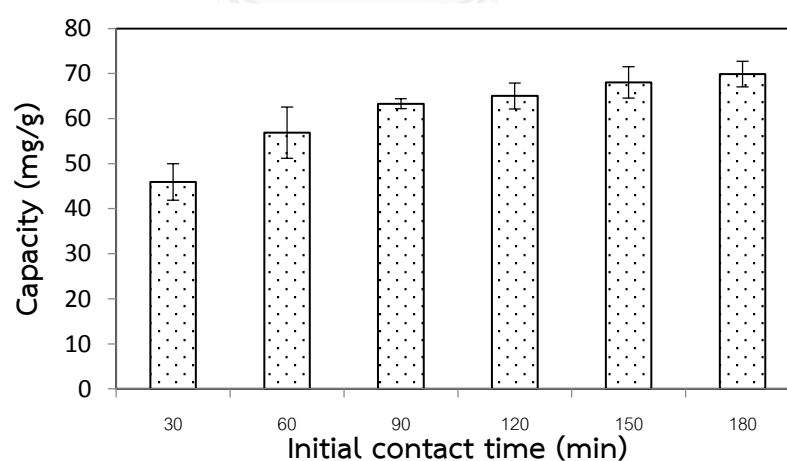
ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชหลังการดูดซับ	
	กากตะกอน	MB-sludge
2.0	2.63 ± 0.07	-
4.0	5.83 ± 0.02	5.63 ± 0.03
6.0	6.26 ± 0.02	6.07 ± 0.09
8.0	6.59 ± 0.04	6.46 ± 0.06
10.0	6.98 ± 0.03	7.18 ± 0.07

จากตารางที่ 4.6 พีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22 ก่อนและหลังการดูดซับด้วยกากตะกอนและ MB-sludge มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และจากการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอนและ MB-sludge ในน้ำปราศจากไอออนที่มีค่าพีเอชประมาณ 6.6 ถึง 6.8 พบว่าค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอนและ MB-sludge มีค่าเป็นลบ ดังนั้น ในสารละลายสีย้อม reactive red 22 ที่มีค่าพีเอชก่อนหรือหลังการดูดซับประมาณ 6 ผิวของตัวดูดซับทั้งสองชนิดแสดงความเป็นลบ และเมื่อพิจารณาชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนผิวพบว่า ผิวของตัวดูดซับน่าจะแสดงความเป็นลบมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลาย ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุลบของสีย้อม reactive red 22 ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีของ reactive red 22 ด้วย MB-sludge อยู่ในช่วง 4 ถึง 10 ส่วนพีเอชที่เหมาะสมของการใช้กากตะกอนกำจัดสีของ reactive red 22 คือพีเอช 2 และเนื่องด้วยในกระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอด้วยสี้อมรีแอคทีฟ ผู้ผลิตมักทำการปรับค่าพีเอชของน้ำย้อมให้มีค่าอยู่ในช่วง 10.5 ถึง 11 (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545) ดังนั้น การใช้ MB-sludge เป็นตัวดูดซับจึงเหมาะสมมากกว่าการใช้กากตะกอน โดยไม่จำเป็นต้องปรับค่าพีเอชของน้ำเสียก่อนการกำจัดสี้อม สำหรับการศึกษาดังกล่าว ผู้วิจัยได้เลือกพีเอช 10 ในการทดลอง เนื่องจากเป็นพีเอชที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงและเป็นพีเอชที่สามารถตรึงสี้อม methylene blue บนผิวของกากตะกอนได้ดี แม้จะมีการคายซับของสี้อม methylene blue ปริมาณเล็กน้อย แต่สี้อม methylene blue ที่หลุดละลายออกมาจะสามารถเกิดการรวมตัวกับสี้อม reactive red 22 และตกตะกอนแยกออกจากสารละลายได้

4.3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสี้อม reactive red 22

จากการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสี้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอช 10 ด้วย MB-sludge ในช่วงเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

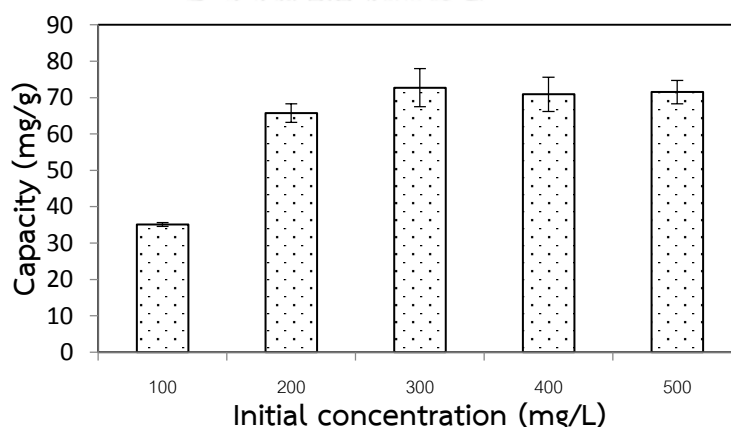


รูปที่ 4.13 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความจุของการดูดซับสี้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 เพิ่มขึ้น จาก 46 ถึง 63 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจาก 30 ถึง 90 นาที จากนั้นค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจาก 90 ถึง 180 นาที และไม่มีการเพิ่มขึ้นของค่าความจุของการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสในช่วง 90 ถึง 180 นาที จึงสรุปได้ว่า ภายใต้ภาวะการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge เข้าสู่สมดุลตั้งแต่ 90 นาทีขึ้นไป

4.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22 ในสารละลายเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอช 10 ต่อการดูดซับด้วย MB-sludge ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14

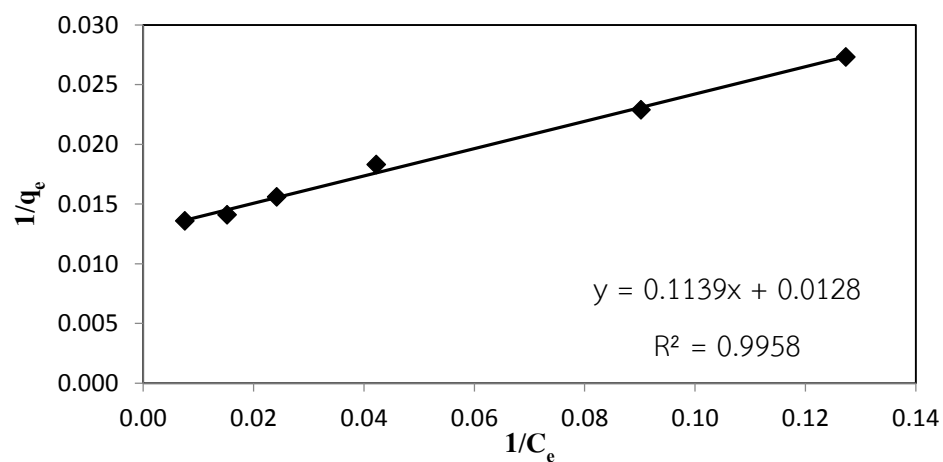


รูปที่ 4. 14 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22 ต่อความจุของการดูดซับด้วย MB-sludge

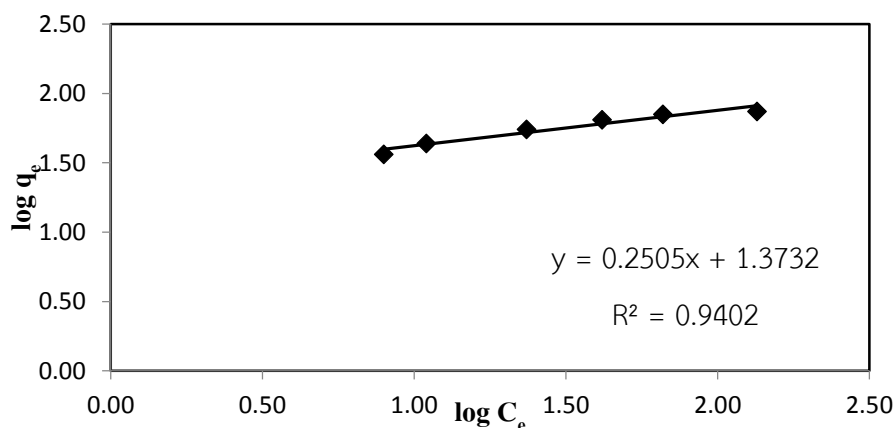
จากผลการทดลองพบว่า ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22 เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้น จาก 35 ถึง 73 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 100 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22 จาก 300 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงสรุปได้ว่า เกิดการดูดซับสีย้อม

reactive red 22 จนเต็มบริเวณ active site บนผิวของ MB-sludge เมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22 ตั้งแต่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป โดยมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับจากการทดลองประมาณ 73 มิลลิกรัมต่อกรัม

ทำการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 โดยนำผลการทดลองมาสร้างไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ตามสมการเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์และฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม ผลแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 และข้อมูลจากไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ตามแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ตามแบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม

ตารางที่ 4. 7 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge

ไอโซเทอร์ม	สมการเส้นตรง	r^2	q_m (mg/g)	b (L/mg)
แลงเมียร์	$y = 0.1139x + 0.0128$	0.9958	77.95	0.11

ไอโซเทอร์ม	สมการเส้นตรง	r^2	n	K (L/g)
ฟรุนด์ลิช	$y = 0.2505x + 1.3732$	0.9402	3.99	23.62

จากการนำผลการทดลองมาสร้างกราฟตามสมการเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge เป็นไปตามความสัมพันธ์ของแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์มมากกว่าแบบจำลองฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม โดยสังเกตจากค่า coefficient of determination (r^2) ที่สูงกว่า โดย r^2 ของการสร้างกราฟตามแบบจำลองแลงเมียร์มีค่าประมาณ 0.99 จึงอาจสรุปได้ว่า พฤติกรรมดูดซับเป็นไปตามสมมติฐานของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม นั่นคือ แต่ละตำแหน่งแอคทีฟของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 1 โมเลกุลหรือไอออน การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวและสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยมีค่าคงที่ของ Langmuir เท่ากับ 0.11 L/mg ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับคำนวณได้จากสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มเท่ากับ 78 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง (73 มิลลิกรัมต่อกรัม) จึงเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์มสามารถอธิบายพฤติกรรมดูดซับสีย้อมได้ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4. 8 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 จากการทดลอง (q_{exp}) ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (q_L) และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช (q_F)

q_{exp} (mg/g)	q_L (mg/g)	q_F (mg/g)
36.65 ± 0.59	36.63 ± 3.61	39.69 ± 1.84
43.61 ± 0.14	43.34 ± 0.63	43.02 ± 0.35
54.70 ± 1.91	56.80 ± 3.23	52.05 ± 2.67
63.91 ± 2.36	64.28 ± 1.59	60.12 ± 2.12
70.67 ± 4.81	68.81 ± 1.16	67.47 ± 2.38
73.45 ± 4.60	73.24 ± 0.38	80.68 ± 1.71

จากการเปรียบเทียบค่าความจุของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 จากการทดลองกับไอโซเทอร์มดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ค่าความจุของการดูดซับจากการทดลองกับค่าที่คำนวณโดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียงกัน และจากการคำนวณค่า average percentage error พบว่าค่า average percentage error ของค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการแลงเมียร์เมื่อเทียบกับค่าจริงจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าพรมูลติช โดยมีค่าเท่ากับ 1.3% และ 5.8% ตามลำดับ จึงยืนยันได้ว่าแลงเมียร์ไอโซเทอร์มใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าพรมูลติชไอโซเทอร์ม

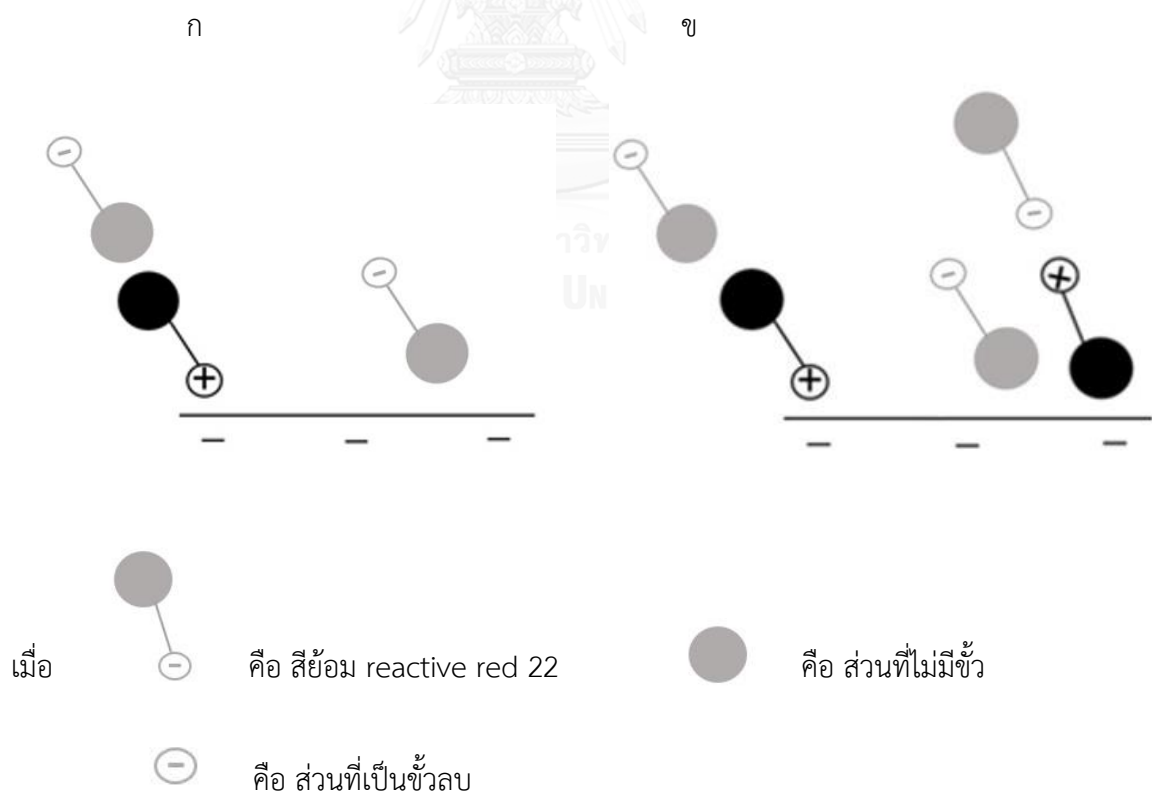
ตารางที่ 4. 9 ค่าความจุของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟที่ฟด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	สีย้อม	q _m (mg/g)	ผู้วิจัย
Suspended activated sludge	1) Reactive yellow 2 2) Reactive blue 2	1) 333.3 2) 250.0	Aksu (2001)
1) Physical-chemical sludge 2) Biological sludge	Reactive red 2	1) 213.9 2) 159.3	Sonai et al. (2016)
Activated sludge	Reactive black 5	116	Gulnaz et al. (2006)
MB-sludge	Reactive red 22	78.0	งานวิจัยนี้
Industrial laundry sewage sludge-based activated carbon	Remazol brilliant blue R	33.5	Silva et al. (2016)
Sludge	Rhodamine-B	7.2	Ju et al. (2008)

การเปรียบเทียบค่าความจุสูงสุดของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟของ MB-sludge ในงานวิจัยนี้กับภาคก่อนชนิดต่างๆในงานวิจัยอื่นแสดงดังตารางที่ 4.9 เนื่องจากไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อม reactive red 22 การเปรียบเทียบค่าความจุของการดูดซับอาจเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสีย้อมรีแอกทีฟแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน

4.3.4 กลไกการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge

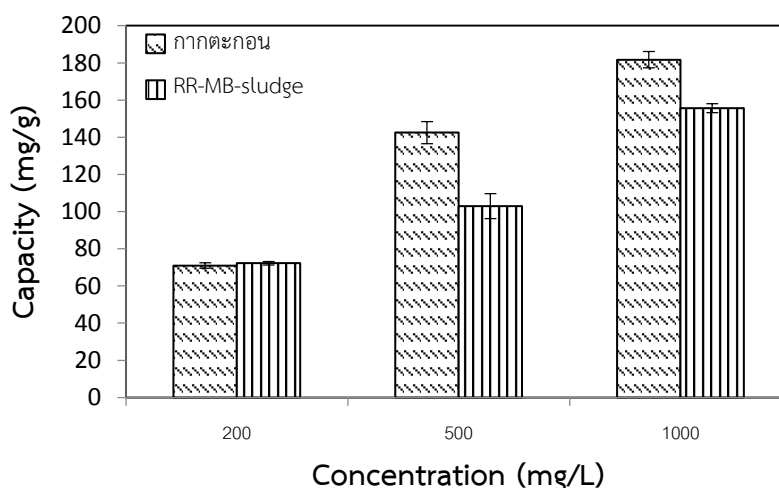
จากผลการศึกษาสมบัติของ MB-sludge และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge พบว่า MB-sludge ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้ว ซึ่งได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอมีน และประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว การดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge อาจเกิดจาก 2 กระบวนการ ได้แก่ 1. การดูดซับทางกายภาพระหว่างบริเวณไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วของ MB-sludge กับสีย้อม reactive red 22 ส่งผลให้มีประจุลบบนผิวของกากตะกอนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.17 (ก)) และ 2. เกิดการดูดซับด้วย electrostatic interaction และการดูดซับทางกายภาพ (รูปที่ 4.17 (ข)) ซึ่งกลไกการดูดซับทั้ง 2 กระบวนการให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาค่าศักย์ซีต้าของ RR-MB-sludge ที่มีค่าลบมากขึ้นหลังการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ไว้บนผิว พฤติกรรมการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว โดยแต่ละตำแหน่งของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 1 โมเลกุลหรือไอออน และสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้



รูปที่ 4. 17 กลไกการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge

4.4 การนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 มาใช้ดูดซับสีย้อม methylene blue

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนและกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 (RR-MB-sludge) เริ่มจากการเตรียม RR-MB-sludge โดยนำกากตะกอนมาทำการดูดซับสีย้อม methylene blue และ reactive red 22 ตามลำดับ โดยให้มีความจุของการดูดซับใกล้เคียงกับค่าความจุสูงสุดของการดูดซับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 182 และ 78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นำกากตะกอนและ RR-MB-sludge มาทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18

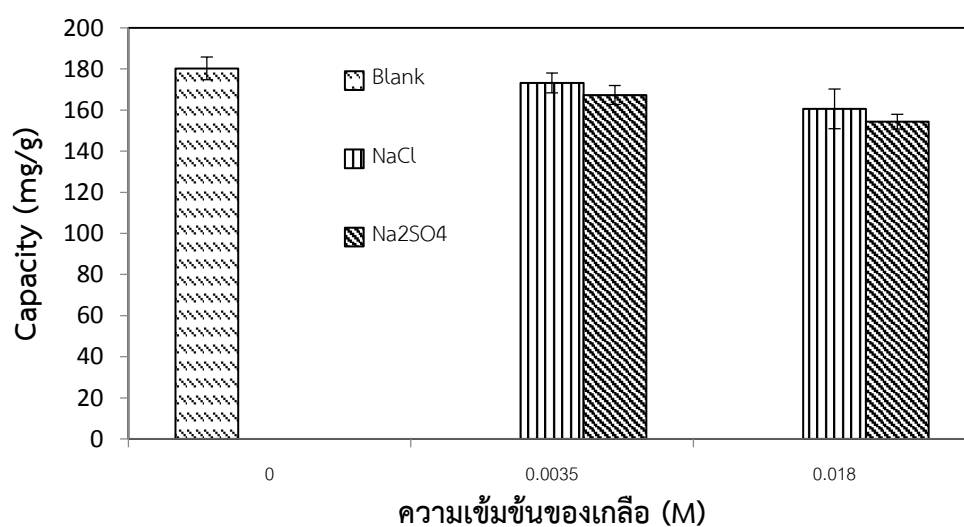


รูปที่ 4.18 ความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนและ RR-MB-sludge

จากผลการทดลองพบว่า ในการใช้กากตะกอนและ RR-MB-sludge ดูดซับสีย้อม methylene blue ที่ความเข้มข้นต่ำ ประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมขึ้นพบว่า กากตะกอนสามารถดูดซับสีย้อม methylene blue ที่ความเข้มข้น 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรได้มากกว่าการใช้ RR-MB-sludge โดยมีผลต่างของค่าความจุของการดูดซับเท่ากับ 39 และ 26 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสหรือปริมาณหมู่แอคทีฟบนผิว RR-MB-sludge มีค่าน้อยลง อาจเนื่องมาจากพื้นผิวของ RR-MB-sludge มีสีย้อมสองชนิดถูกดูดซับอยู่ จึงสรุปได้ว่า สามารถนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอคทีฟกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมได้อีก แต่ประสิทธิภาพการทำงานจะต่ำกว่ากากตะกอนเริ่มต้น

4.5 ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22

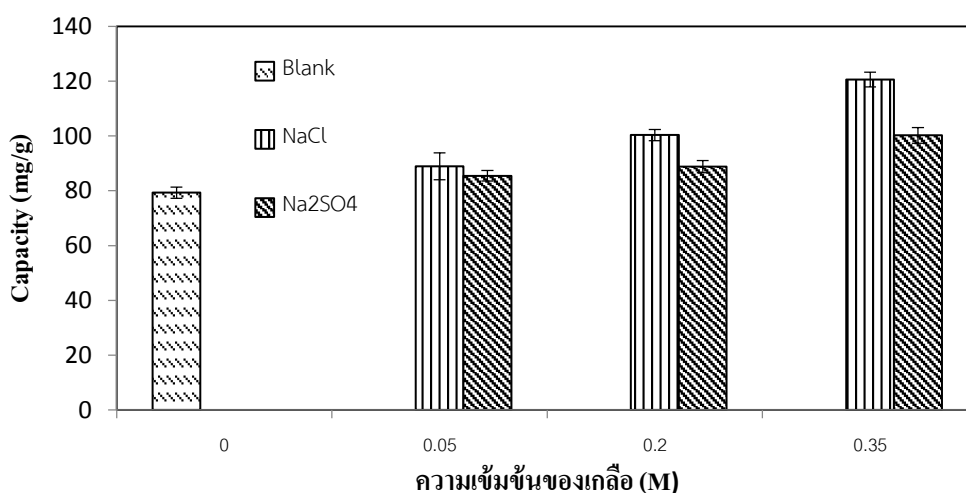
ในการศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อมเบสิก นำสารละลายสีย้อม methylene blue มาผสมกับเกลือ NaCl หรือเกลือ Na_2SO_4 เข้มข้น 0 ถึง 0.018 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ ทำการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนในสารละลายที่มีเกลือ

จากผลการทดลอง ค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือ NaCl และ Na_2SO_4 เพิ่มขึ้น โดยค่าความจุของการดูดซับสีย้อม methylene blue ในสารละลายที่ไม่มีเกลือผสมอยู่ (blank) มีค่าเท่ากับ 180.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนค่าความจุของการดูดซับในสารละลายที่มีเกลือ NaCl เข้มข้น 0.0035 และ 0.018 โมลาร์ผสมอยู่มีค่าเท่ากับ 173.2 และ 160.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าความจุของการดูดซับในสารละลายที่มีเกลือ Na_2SO_4 เข้มข้น 0.0035 และ 0.018 โมลาร์ผสมอยู่มีค่าเท่ากับ 167.3 และ 154.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่าความจุของการดูดซับในสารละลายที่มีเกลือ NaCl และ Na_2SO_4 ความเข้มข้นเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เหตุที่เกลือในสารละลายสีย้อม methylene blue ทำให้ค่าความจุของการดูดซับลดลงเนื่องมาจากไฮเดียมไอออน (Na^+) จากเกลือจะแข่งขันในการดูดซับกับสีย้อม methylene blue บนผิวของกากตะกอน ทำให้ค่าความจุของการดูดซับลดลง (Wang และ Lin, 2011)

ในการศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟ นำสารละลายสี้อม reactive red 22 มาผสมกับเกลือ NaCl หรือเกลือ Na_2SO_4 เข้มข้น 0 ถึง 0.35 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ ทำการดูดซับสี้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.20



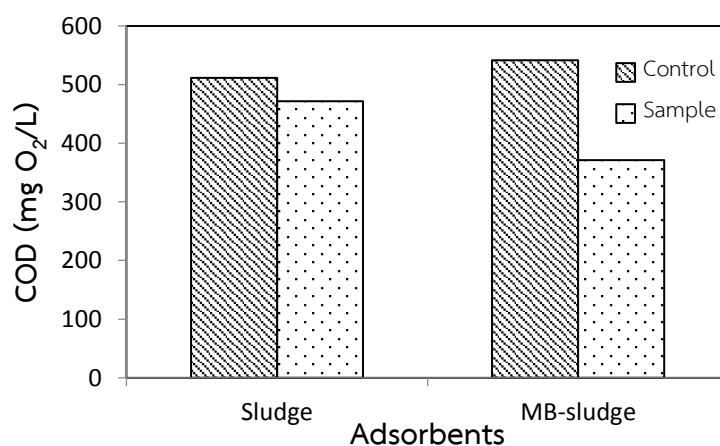
รูปที่ 4. 20 ความจุของการดูดซับสี้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge ในสารละลายที่มีเกลือ

จากผลการทดลอง ค่าความจุของการดูดซับสี้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือ NaCl และ Na_2SO_4 เพิ่มขึ้น โดยค่าความจุของการดูดซับสี้อม reactive red 22 ในสารละลายที่ไม่มีเกลือผสมอยู่ (blank) มีค่าเท่ากับ 79.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนค่าความจุของการดูดซับในสารละลายที่มีเกลือ NaCl เข้มข้น 0.05, 0.2 และ 0.35 โมลาร์ผสมอยู่มีค่าเท่ากับ 88.9, 100.4 และ 120.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าความจุของการดูดซับในสารละลายที่มีเกลือ Na_2SO_4 เข้มข้น 0.05, 0.2 และ 0.35 โมลาร์ผสมอยู่มีค่าเท่ากับ 85.5, 88.8 และ 100.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่าความจุของการดูดซับในสารละลายที่มีเกลือ NaCl และ Na_2SO_4 เข้มข้น 0.05 โมลาร์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้นของเกลือ 0.2 และ 0.35 โมลาร์ สาเหตุที่เกลือในสารละลายสี้อม reactive red 22 ทำให้ค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นอาจสอดคล้องกับเหตุของการใช้เกลือในกระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอด้วยสี้อมรีแอกทีฟ โดยเกลือจะทำให้สารละลายมีจำนวนประจุลบเพิ่มขึ้น จึงเกิดการผลักสี้อมให้แทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้มากยิ่งขึ้น (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545) เมื่อเทียบกับการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟในสารละลายที่มีเกลือ ประจุลบของเกลือจะผลักสี้อมเข้าหาผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับได้มากยิ่งขึ้น

4.6 การดูดซับสีของรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

นำน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอซึ่งใช้สี้อมรีแอกทีฟมาทำการศึกษา โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียบริเวณบ่อพักน้ำก่อนการบำบัด ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียมีสีเขียว มีตะกอนและอนุภาคแขวนลอยอยู่เล็กน้อย จึงทำการแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำเสียด้วยการปั่นเหวี่ยงก่อนการดูดซับ น้ำเสียมีค่าพีเอชเท่ากับ 9.16 การศึกษาทำโดยใช้กากตะกอนมาดูดซับสี้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียที่ถูกปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 2 เปรียบเทียบกับการใช้ MB-sludge ที่ทำการดูดซับในน้ำเสียที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 10 ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.21

จากรูปที่ 4.21 จะสังเกตว่า ค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนการดูดซับ (control) ที่พีเอช 2 และ 10 มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าเท่ากับ 2 มีการตกตะกอนเกิดขึ้น รวมถึงสีของน้ำเสียที่พีเอช 2 มีสีอ่อนกว่าสีของน้ำเสียที่พีเอช 10 เล็กน้อย ตะกอนที่เกิดขึ้นจึงอาจเกิดจากการตกตะกอนของสี้อมรีแอกทีฟ และอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่พีเอช 2 มีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 10 เล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 511.36 และ 541.44 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4. 21 ค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนและหลังการดูดซับด้วยกากตะกอนและ MB-sludge

หลังการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกากตะกอนพบว่า ค่าซีไอตีของน้ำเสียลดลง โดยมีค่าซีไอตีหลังการดูดซับเท่ากับ 471.44 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร หรือสามารถลดค่าซีไอตีลงได้ 7.8% ส่วนค่าซีไอตีของน้ำเสียหลังการดูดซับด้วย MB-sludge มีค่าเท่ากับ 370.99 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร หรือสามารถลดค่าซีไอตีลงได้ 31.48% แสดงให้เห็นว่า กากตะกอนและ MB-sludge สามารถลดค่าซีไอตีของน้ำเสียจริงในงานวิจัยนี้ได้ แต่การใช้ MB-sludge ให้ผลการกำจัดสารปนเปื้อนที่ดีกว่าการใช้กากตะกอน และการใช้ MB-sludge ทำให้น้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าซีไอตีต่ำกว่า 400 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมอนุโลมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ยังมีค่าซีไอตีเกินค่ามาตรฐานโดยทั่วไปซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ซึ่งหากต้องการให้ค่าซีไอตีของน้ำเสียหลังการบำบัดต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ควรทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ใช้หรือลดขนาดอนุภาคของตัวดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์การดูดซับสีย้อมแบบลำดับชั้นในน้ำเสียจริง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกากตะกอนที่ใช้ ชนิดของสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย รวมถึงปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนผิวของกากตะกอนในชั้นแรก เนื่องจากงานวิจัยของ Zhang et al. (2012) ได้พบว่า การดูดซับสีย้อมเบสิกด้วยฟางข้าวที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเอซิดต่างชนิดกัน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้น ชนิดและปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับในชั้นแรกจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในชั้นถัดไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาใช้เป็นตัวดูดซับสี้อมเบสิกและสี้อมรีแอกทีฟ จากการศึกษาหุ้ฟงักซันทางเคมีและค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอนพบว่า ผิวของกากตะกอนมีความเป็นประจุลบ เมื่อนำกากตะกอนมาทำการดูดซับสี้อม methylene blue ซึ่งมีประจุบวกพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี้อม methylene blue คือ พีเอช 4 ถึง 10
2. การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม methylene blue ส่งผลให้ค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยค่าความจุของการดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อมสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. การดูดซับเข้าสู่สมดุลใช้ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที
4. จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่า พฤติกรรมการดูดซับสี้อม methylene blue ด้วยกากตะกอนสามารถอธิบายได้ด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม แสดงให้เห็นว่า การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 182 มิลลิกรัมต่อกรัม
5. จากการศึกษาผลของเกลือ NaCl และเกลือ Na_2SO_4 ต่อการดูดซับพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือส่งผลให้ค่าความจุของการดูดซับลดลง อาจเกิดจากการแข่งขันในการดูดซับ

จากการศึกษาค่าศักย์ซีต้าของกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสี้อม methylene blue ผิวของ MB-sludge มีความเป็นประจุลบน้อยลง เมื่อนำตัวดูดซับดังกล่าวมาใช้ในการดูดซับสี้อม reactive red 22 ซึ่งมีประจุลบพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสี้อม reactive red 22 อยู่ในช่วง 4 ถึง 10 ส่วนที่พีเอช 2 เกิดการคายซับของสี้อม methylene blue ปริมาณสูง
2. การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม reactive red 22 ส่งผลให้ค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยค่าความจุของการดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ระยะเวลาสัมผัสที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลคือ 90 นาที
4. จากการศึกษาไอโซเทอร์มพบว่า พฤติกรรมการดูดซับสีย้อม reactive red 22 ด้วย MB-sludge สามารถอธิบายได้ด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และมีค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 78 มิลลิกรัมต่อกรัม
5. จากการศึกษาผลของเกลือ NaCl และเกลือ Na_2SO_4 ต่อการดูดซับพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือส่งผลให้ค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้น

เมื่อนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดมาทำการดูดซับสีย้อม methylene blue อีกครั้งพบว่า กากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดสามารถนำมาใช้ดูดซับสีย้อม methylene blue ได้อีก แต่จะมีค่าความจุของการดูดซับน้อยกว่าการใช้กากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยกากตะกอนและ MB-sludge พบว่า ทั้งกากตะกอนและ MB-sludge สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียได้ โดยหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดพบว่า น้ำเสียมีค่าซีโอดีลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมแบบหลายชั้นด้วยกากตะกอนจากระบวนการบำบัดน้ำเสียแหล่งต่างๆ
2. ใช้หน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI) ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานการวัดสีในการศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

รายการอ้างอิง

- Aksu, Z. (2001). Biosorption of reactive dyes by dried activated sludge: equilibrium and kinetic modelling. *Biochemical Engineering Journal*, 7(1), 79-84.
- Basibuyuk, M., & Forster, C. (2003). An examination of the adsorption characteristics of a basic dye (Maxilon Red BL-N) on to live activated sludge system. *Process Biochemistry*, 38(9), 1311-1316.
- Cardenas-Peña, A. M., Ibanez, J. G., & Vasquez-Medrano, R. (2012). Determination of the point of zero charge for electrocoagulation precipitates from an iron anode. *Int. J. Electrochem. Sci*, 7, 6142-6153.
- Chu, H. C., Lin, L. H., Liu, H. J., & Chen, K. M. (2013). Utilization of dried activated sludge for the removal of basic dye from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 51(37-39), 7074-7080.
- Chu, H., & Chen, K. (2002). Reuse of activated sludge biomass: I. Removal of basic dyes from wastewater by biomass. *Process Biochemistry*, 37(6), 595-600.
- Fan, S., Tang, J., Wang, Y., Li, H., Zhang, H., Tang, J., Wang, Z. & Li, X. (2016). Biochar prepared from co-pyrolysis of municipal sewage sludge and tea waste for the adsorption of methylene blue from aqueous solutions: kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 220, 432-441.
- Gulnaz, O., Kaya, A., & Dincer, S. (2006). The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. *Journal of Hazardous Materials*, 134(1), 190-196.
- Gulnaz, O., Kaya, A., Matyar, F., & Arıkan, B. (2004). Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 108(3), 183-188.
- Ju, D., Byun, I., Park, J., Lee, C., Ahn, G., & Park, T. (2008). Biosorption of a reactive dye (Rhodamine-B) from an aqueous solution using dried biomass of activated sludge. *Bioresource technology*, 99(17), 7971-7975.
- Junxiong, C., Longzhe, C., Yanxin, W., & Chengfu, L. (2009). Effect of functional groups on sludge for biosorption of reactive dyes. *Journal of Environmental Sciences*, 21(4), 534-538.

- Konicki, W., Aleksandrak, M., & Mijowska, E. (2017). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on adsorption of cationic dyes from aqueous solutions using graphene oxide. *Chemical Engineering Research and Design*.
- Leng, L., Yuan, X., Huang, H., Shao, J., Wang, H., Chen, X., & Zeng, G. (2015). Bio-char derived from sewage sludge by liquefaction: Characterization and application for dye adsorption. *Applied Surface Science*, 346, 223-231.
- Li, W. H., Yue, Q. Y., Gao, B. Y., Ma, Z. H., Li, Y. J., & Zhao, H. X. (2011). Preparation and utilization of sludge-based activated carbon for the adsorption of dyes from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 171(1), 320-327.
- Li, W., Yue, Q., Tu, P., Ma, Z., Gao, B., Li, J., & Xu, X. (2011). Adsorption characteristics of dyes in columns of activated carbon prepared from paper mill sewage sludge. *Chemical Engineering Journal*, 178, 197-203.
- Ma, W., Song, X., Pan, Y., Cheng, Z., Xin, G., Wang, B., & Wang, X. (2012). Adsorption behavior of crystal violet onto opal and reuse feasibility of opal-dye sludge for binding heavy metals from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 193, 381-390.
- Mahmoud, M. E., Nabil, G. M., El-Mallah, N. M., Bassiouny, H. I., Kumar, S., & Abdel-Fattah, T. M. (2016). Kinetics, isotherm, and thermodynamic studies of the adsorption of reactive red 195 A dye from water by modified Switchgrass Biochar adsorbent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 37, 156-167.
- Namasivayam, C., Sangeetha, D., & Gunasekaran, R. (2007). Removal of anions, heavy metals, organics and dyes from water by adsorption onto a new activated carbon from *Jatropha* husk, an agro-industrial solid waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(2), 181-184.
- National Programme on Technology Enhanced Learning. Module 22: Sludge Management. Retrieved 20 May, 2017, from <http://nptel.ac.in/courses/105105048/M22L36.pdf>
- Rensselaer. (2013). Adsorption zone progression. Retrieved 16 January, 2016, from <http://www.ewprpi.edu/hartford/~ernesto/F2013/AWPPCE/Images/Water/AdsorptionZoneProgression.jpg>

- Shi, L., Zhang, G., Wei, D., Yan, T., Xue, X., Shi, S., & Wei, Q. (2014). Preparation and utilization of anaerobic granular sludge-based biochar for the adsorption of methylene blue from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, *198*, 334-340.
- Shrama, B. K. (2014). *Industrial Chemistry (including Chemical Engineering)* (6 ed.): Goel Publishing House.
- Silva, T. L., Ronix, A., Pezoti, O., Souza, L. S., Leandro, P. K., Bedin, K. C., Beltram, K. K., Cazetta, A. L. & Almeida, V. C. (2016). Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R. *Chemical Engineering Journal*, *303*, 467-476.
- Sonai, G. G., de Souza, S. M. G. U., de Oliveira, D., & de Souza, A. A. U. (2016). The application of textile sludge adsorbents for the removal of Reactive Red 2 dye. *Journal of environmental management*, *168*, 149-156.
- Wang, X. S., & Lin, H. Q. (2011). Adsorption of basic dyes by dried waste sludge: Kinetic, equilibrium and desorption studies. *Desalination and Water Treatment*, *29*(1-3), 10-19.
- Weng, C. H., & Pan, Y. F. (2006). Adsorption characteristics of methylene blue from aqueous solution by sludge ash. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *274*(1), 154-162.
- Yuliani, G., Garnier, G., & Chaffee, A. L. (2016). Utilization of raw and dried Victorian brown coal in the adsorption of model dyes from solution. *Journal of Water Process Engineering*.
- Zhang, W., Li, H., Kan, X., Dong, L., Yan, H., Jiang, Z., Yang, H., Li, A. & Cheng, R. (2012). Adsorption of anionic dyes from aqueous solutions using chemically modified straw. *Bioresource technology*, *117*, 40-47.
- Zhang, W., Yan, H., Li, H., Jiang, Z., Dong, L., Kan, X., Yang, H., Li, A., & Cheng, R. (2011). Removal of dyes from aqueous solutions by straw based adsorbents: batch and column studies. *Chemical Engineering Journal*, *168*(3), 1120-1127.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2546). การจัดการกากตะกอนน้ำเสียชุมชน. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2548). แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมฟอกย้อม.

กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ชาญวิทย์ โมรารัตน์, ธ. ศ., ปัญญาพล บุเงิน, เพ็ญญา ประกิจ,. (2554). การนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พระราชวรรณ ศรีนาค. (2552). การควบคุมมลพิษทางน้ำ (2 ed.). กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. บทที่ 15 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี. Retrieved 20 กุมภาพันธ์, 2560, from <http://www2.diw.go.th/Research/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9C%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B9%88/A15-COD-w.pdf>

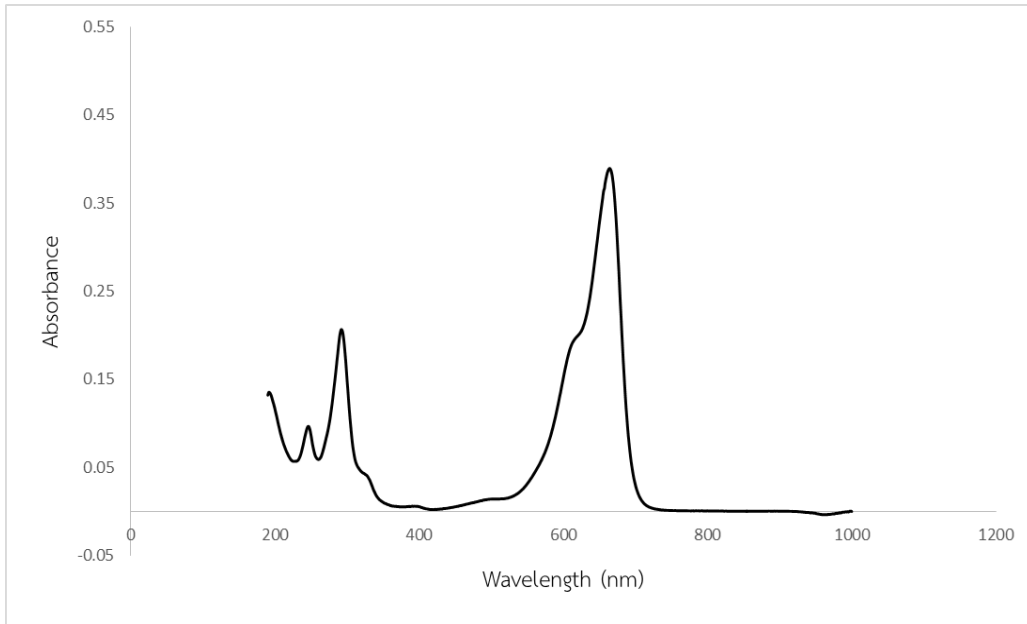
สกุลรัตน์ รัตนายน. (2551). การปรับปรุงกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำทิ้งจากบ้านเรือนของกรุงเทพมหานครด้วยสารลดแรงตึงผิว เพื่อกำจัดสีย้อมเอซิดออกจากน้ำเสียฟอกย้อมสิ่งทอ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. (2550). ประเภทของสีย้อม. Retrieved 16 มีนาคม, 2560, from http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true

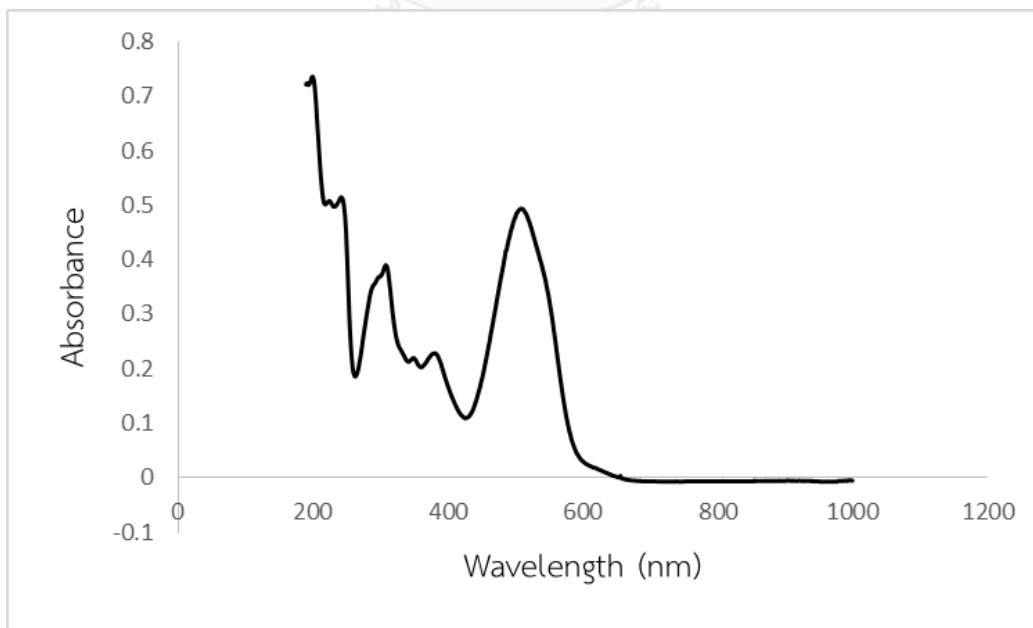
อภิชาติ สนธิสมบัติ. (2545). กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.



1. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่มีความยาวคลื่นต่างๆ



รูปที่ 1.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อม methylene blue

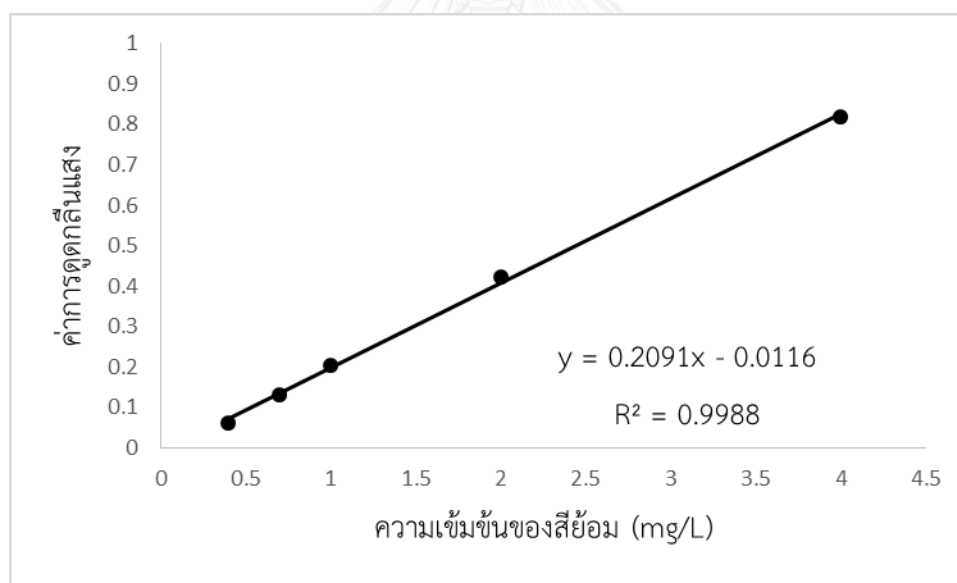


รูปที่ 1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อม reactive red 22

2. ตัวอย่างกราฟมาตรฐาน การคำนวณเปอร์เซ็นต์การกำจัดและค่าความจุของการดูดซับ

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม methylene blue ที่ความเข้มข้นต่างๆ

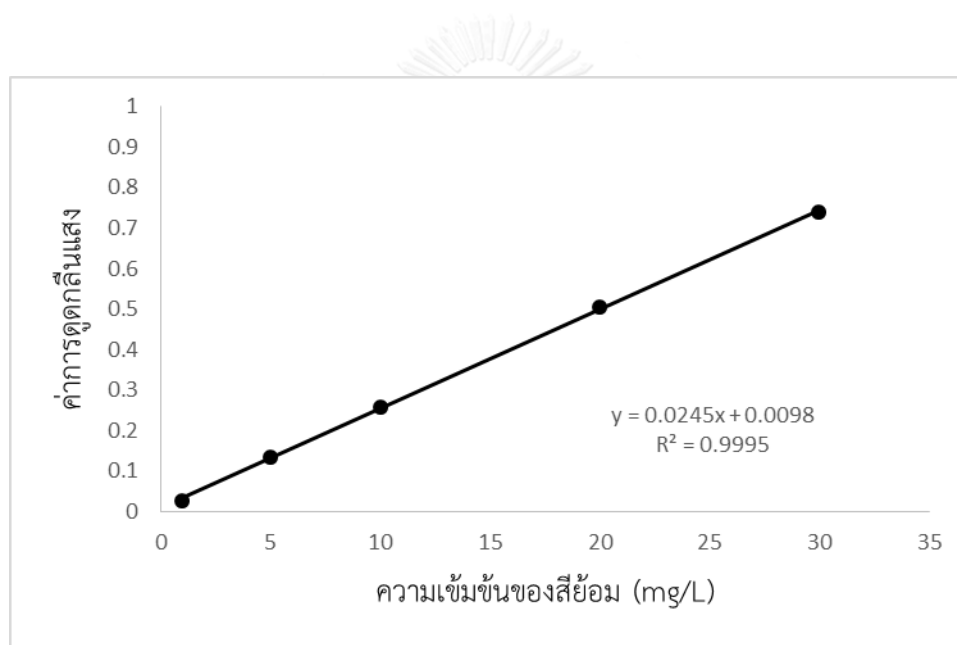
ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.4	0.061625
0.7	0.13227
1	0.20243
2	0.42209
4	0.81738



รูปที่ 2.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม methylene blue

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม reactive red 22 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.026992
5	0.13491
10	0.25847
20	0.50604
30	0.73836



รูปที่ 2.2 กราฟมาตรฐานของสีย้อม reactive red 22

ตัวอย่างการคำนวณ

- หาความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายตัวอย่าง ทำโดยแทนค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย

ตัวอย่างลงในสมการเส้นตรง $y = 0.2091x - 0.0116$

ตัวอย่างมีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.66396

ดังนั้น

$$0.66396 = 0.2091x - 0.0116$$

$$x = (0.66396 + 0.0116)/0.2091 = 3.23 \text{ mg/L}$$

- การหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดสามารถคำนวณจากสูตร

$$\%removal = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) \times 100$$

หากสารละลายสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 94.42 mg/L

ดังนั้น $\%removal = (94.42 - 3.23/94.42) \times 100 = 96.58\%$

- การหาค่าความจุของการดูดซับสามารถคำนวณจากสูตร

$$q = \frac{(C_0 - C)}{m} \times V$$

หากใช้ตัวดูดซับ 0.100 g ต่อน้ำเสีย 0.04 L

ดังนั้น $q = (94.42 - 3.23/0.1) \times 0.04 = 36.48 \text{ mg/g}$

3. ผลการคำนวณจากการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3.1 การหาพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของกากตะกอน

Initial pH	Final pH	SD	Initial pH-Final pH
2.05	3.75	0.09	-1.70
3.06	6.32	0.02	-3.26
4.09	6.45	0.05	-2.36
5.05	6.48	0.04	-1.43
6.02	6.42	0.07	-0.40
7.02	6.42	0.03	0.60
8.05	6.43	0.02	1.62
9.02	6.41	0.03	2.61

ตารางที่ 3.2 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม methylene blue

pH	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	SD	Capacity (mg/g)
2	376.40	284.21	24.49	5.19	36.87
4	366.24	82.65	77.43	2.96	113.44
6	355.53	73.29	79.38	0.89	112.90
8	388.98	68.44	82.40	2.31	128.22
10	353.86	58.60	83.44	2.38	118.10

ตารางที่ 3.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue

Time (min)	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
30	1953.83	1577.54	19.26	150.52	18.01
60	1948.21	1548.45	20.52	159.90	17.81
90	1927.14	1428.13	25.89	199.60	11.57
180	1969.75	1463.75	25.40	202.40	13.21
300	2005.95	1496.34	25.40	203.84	1.52

ตารางที่ 3.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม methylene blue

C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
102.40	2.80	97.26	39.84	0.14
399.08	38.90	90.25	144.07	0.74
672.80	247.54	63.21	170.10	8.92
933.14	490.14	52.79	197.04	2.32
1468.90	949.59	35.35	207.72	29.40
1947.61	1442.75	25.92	201.94	14.01

ตารางที่ 3.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue

C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	% removal	Capacity, q_e (mg/g)	SD
94.42	3.30	96.51	36.45	0.03
202.67	10.60	94.77	76.83	0.35
416.59	55.43	86.69	144.46	1.94
607.29	191.50	68.47	166.32	4.82
914.57	434.91	52.45	191.87	2.36
1143.39	680.07	40.52	185.33	7.33

ตารางที่ 3.6 ค่าที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม methylene blue

C_e (mg/L)	$\log C_e$	$1/C_e$	q_e (mg/g)	$\log q_e$	$1/q_e$
3.30	0.52	0.3034	36.45	1.56	0.0274
10.60	1.03	0.0943	76.83	1.89	0.0130
55.43	1.74	0.0180	144.46	2.16	0.0069
191.50	2.28	0.0052	166.32	2.22	0.0060
434.91	2.64	0.0023	191.87	2.28	0.0052
680.07	2.83	0.0015	185.33	2.27	0.0054

ตารางที่ 3.7 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22 ต่อการดูดซับด้วยกากตะกอน

pH	C_0 (mg/L)	C (mg/L)	% removal	SD	Capacity (mg/g)
2	176.23	109.18	38.05	4.34	26.82
4	182.97	176.46	3.40	1.13	2.46
6	183.41	178.76	2.55	1.03	1.85
8	181.76	175.94	2.29	0.58	1.65
10	181.84	177.90	1.54	0.15	1.11

ตารางที่ 3.7 ผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22 ต่อการดูดซับด้วย MB-sludge

pH	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	SD	Capacity (mg/g)
2	-	-	-	-	-
4	182.97	39.18	78.59	2.04	57.52
6	183.41	41.41	77.42	6.01	56.80
8	181.76	45.84	74.78	5.13	54.37
10	181.84	51.67	71.59	4.27	52.07

ตารางที่ 3.8 ความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ที่หลุดละลายในการทดลองผลของค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม reactive red 22 ต่อการดูดซับด้วย MB-sludge

Sample (pH)	Methylene blue conc. (mg/L)	SD
4	0.64	0.06
6	0.63	0.14
8	0.63	0.04
10	0.56	0.02

ตารางที่ 3.9 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22

Time (min)	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
30	486.41	371.63	23.60	45.91	4.05
60	489.05	346.83	29.08	56.89	5.71
90	484.00	325.75	32.70	63.30	1.12
120	487.72	325.16	33.33	65.03	2.86
150	479.07	308.88	35.53	68.06	3.50
180	485.11	310.42	36.01	69.87	2.84

ตารางที่ 3.10 ความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ที่หลุดละลายจาก MB-sludge ในการทดลองผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22

Sample (min)	Methylene blue conc. (mg/L)	SD
30	1.14	0.20
60	1.23	0.19
90	1.50	0.24
120	1.74	0.30
150	1.88	0.27
180	1.96	0.32

ตารางที่ 3.11 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22

C_0 (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
99.06	11.35	88.54	35.08	0.51
204.28	39.87	80.49	65.77	2.56
298.68	116.83	60.87	72.73	5.26
407.98	230.73	43.45	70.90	4.68
505.53	326.71	35.37	71.53	3.23

ตารางที่ 3.12 ความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ที่หลุดละลายจาก MB-sludge ในการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม reactive red 22

Sample (mg/L)	Methylene blue conc. (mg/L)	SD
99.06	0.69	0.02
204.28	1.58	0.33
298.68	1.40	0.22
407.98	1.61	0.23
505.53	2.03	0.39

ตารางที่ 3.13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22

C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	% removal	Capacity, q_e (mg/g)	SD
99.49	7.86	92.10	36.65	0.59
120.11	11.08	90.77	43.61	0.14
160.43	23.67	85.25	54.70	1.91
201.02	41.25	79.48	63.91	2.36
242.42	65.74	72.88	70.67	4.81
317.76	134.14	57.79	73.45	4.60

ตารางที่ 3.14 ค่าที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22

C_e (mg/L)	$\log C_e$	$1/C_e$	q_e (mg/g)	$\log q_e$	$1/q_e$
7.86	0.90	0.1273	36.65	1.56	0.0273
11.08	1.04	0.0902	43.61	1.64	0.0229
23.67	1.37	0.0422	54.70	1.74	0.0183
41.25	1.62	0.0242	63.91	1.81	0.0156
65.74	1.82	0.0152	70.67	1.85	0.0141
134.14	2.13	0.0075	73.45	1.87	0.0136

ตารางที่ 3.15 ความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ที่หลุดละลายจาก MB-sludge ในการทดลองไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม reactive red 22

Sample (mg/L)	Methylene blue conc. (mg/L)	SD
99.49	0.81	0.429
120.11	0.45	0.051
160.43	0.39	0.033
201.02	0.50	0.021
242.42	0.63	0.073
317.76	1.05	0.004

ตารางที่ 3.16 การนำกากตะกอนที่ผ่านการดูดซับสีย้อม methylene blue และสีย้อม reactive red 22 มาใช้ดูดซับสีย้อม methylene blue

Adsorbents	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
Sludge	195.27	17.87	90.85	70.96	1.43
	474.93	118.72	75.00	142.48	5.98
	975.82	521.55	46.55	181.71	4.42
RR-MB-sludge	195.27	14.63	92.51	72.26	0.94
	474.93	217.48	54.21	102.98	6.75
	975.82	586.91	39.85	155.56	2.41

ตารางที่ 3.17 ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม methylene blue

Salts	Salt conc. (M)	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
Blank	0	954.65	504.07	47.20	180.23	5.51
NaCl	0.0035	946.61	513.70	45.73	173.17	4.79
	0.018	955.60	554.19	42.01	160.56	9.65
Na ₂ SO ₄	0.0035	961.10	542.77	43.53	167.33	4.62
	0.018	952.35	566.36	40.53	154.39	3.62

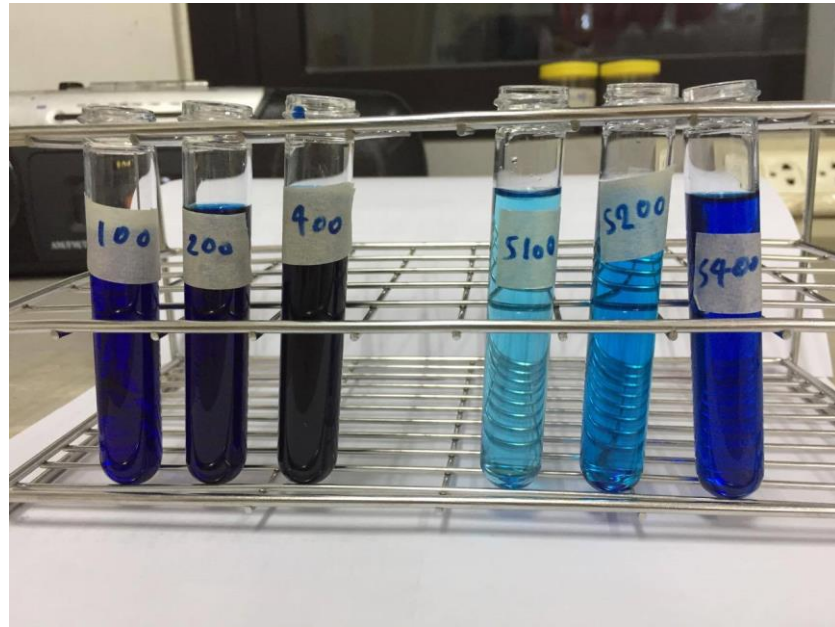
ตารางที่ 3.18 ศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22

Salts	Salt conc. (M)	C ₀ (mg/L)	C (mg/L)	% removal	Capacity (mg/g)	SD
Blank	0	320.85	122.55	61.81	79.32	2.03
NaCl	0.05	320.99	98.65	69.27	88.94	4.92
	0.2	318.71	67.83	78.72	100.35	2.07
	0.35	322.82	21.22	93.43	120.64	2.66
Na ₂ SO ₄	0.05	320.57	106.93	66.65	85.46	1.95
	0.2	320.00	97.98	69.38	88.81	2.25
	0.35	321.72	71.16	77.88	100.22	2.83

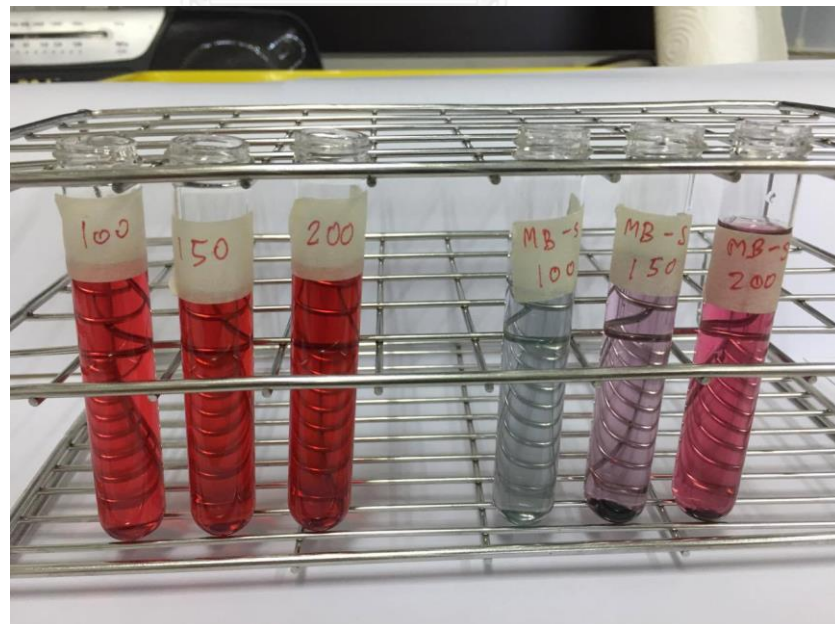
ตารางที่ 3.19 ความเข้มข้นของสีย้อม methylene blue ที่หลุดละลายจาก MB-sludge ในการทดลองศึกษาผลของเกลือต่อการดูดซับสีย้อม reactive red 22

Sample (mg/L)		Methylene blue conc. (mg/L)	SD
Salts	Salt conc. (M)		
Blank	0	1.15	0.091
NaCl	0.05	0.91	0.091
	0.2	1.01	0.005
	0.35	0.92	0.036
Na ₂ SO ₄	0.05	0.82	0.012
	0.2	0.77	0.036
	0.35	0.80	0.055

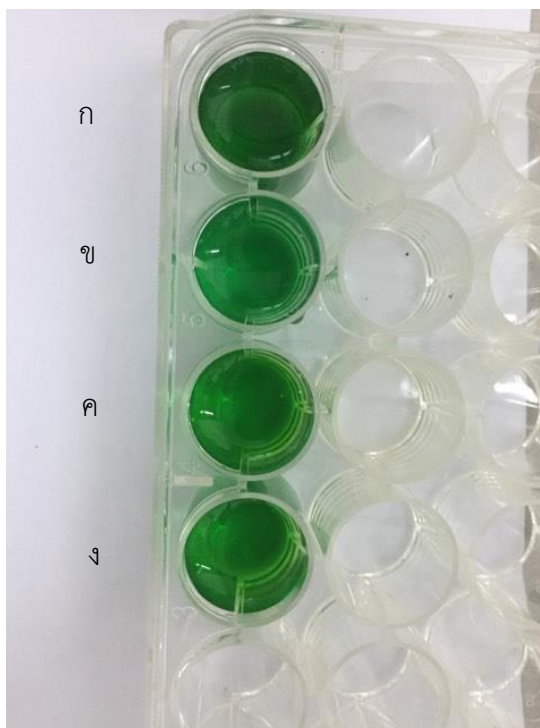
4. ตัวอย่างสารละลายก่อนและหลังการดูดซับ



รูปที่ 4.1 สารละลายสีย้อม methylene blue เข้มข้น 100, 200 และ 400 mg/L ก่อนการดูดซับ (ซ้าย) และหลังการดูดซับ (ขวา)



รูปที่ 4.2 สารละลายสีย้อม reactive red 22 เข้มข้น 100, 150 และ 200 mg/L ก่อนการดูดซับ (ซ้าย) และหลังการดูดซับ (ขวา)



รูปที่ 4.3 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอที่พีเอช 10 ก่อนการดูดซับ (ก) หลังการดูดซับ (ข)
ที่พีเอช 2 ก่อนการดูดซับ (ค) หลังการดูดซับ (ง)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรกิตต์ ไพบรรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

