



การบำบัดน้ำเสียผ้าบาติกโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล



โดย
นางสาวมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การบำบัดน้ำเสียผ้าบาติกโดยกระบวนการดูดซับด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล



โดย
นางสาวกมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

BATIK WASTEWATER ADSORPTION BY BIOMASS POWER PLANT FLY ASH



By

MISS Kamonrat KLIANGPRADITH

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การบำบัดน้ำเสียผ้าบาติกโดยกระบวนการดูดซับด้วยเถ้าลอยจาก
โรงไฟฟ้าชีวมวล
โดย กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผนก ก แบบ ก 1 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. พรทิพย์ ศรีแดง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

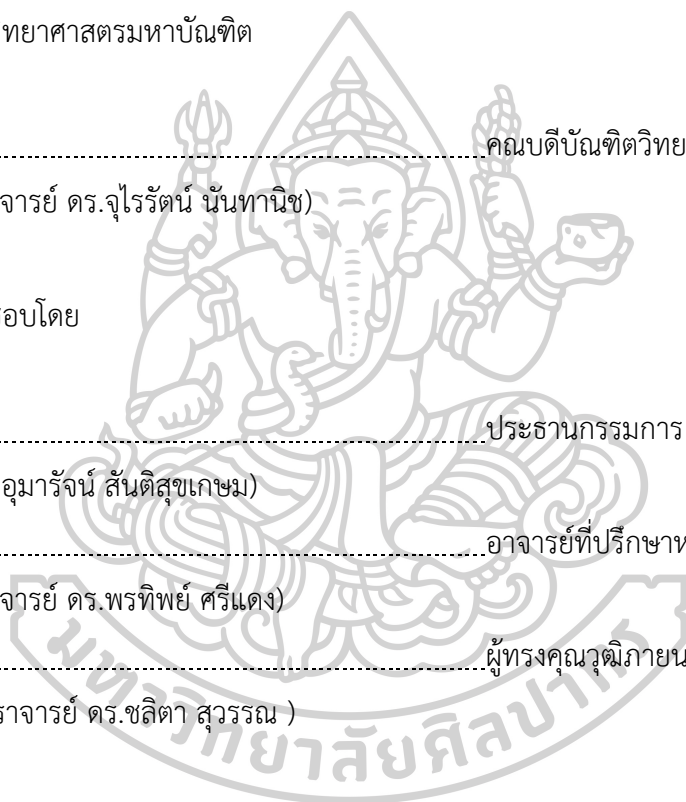
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.อุมารัชนี สันติสุขเกษม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ ศรีแดง)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลิตา สุวรรณ)



61311201 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ถ้ำลอย, การดูดซับ, สีย้อมสังเคราะห์, น้ำเสียผ้าบาติก

นางสาว กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์: การบำบัดน้ำเสียผ้าบาติกโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. พรทิพย์ ศรีแดง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล 2 ชนิด คือ ถ้ำลอยไม้ยางพาราและถ้ำลอยแกลบ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาสัมผัส ขนาดของถ้ำลอย ปริมาณของถ้ำลอย และขยายผลในชุดการทดลองขนาดใหญ่ ผลการศึกษาพบว่า ถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิด สามารถดูดซับ COD และสีย้อมได้ ดังนี้ ถ้ำลอยไม้ยางพารามีประสิทธิภาพการดูดซับ COD และสีย้อมจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์ที่น้ำเงินที่ pH 7 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 100 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมสูงสุดประมาณร้อยละ 96 และ 98 ตามลำดับ และมีแนวโน้มการดูดซับเข้าสู่สมดุลและคงที่ภายหลังจากระยะเวลาสัมผัส 18 ชั่วโมง ขณะที่ถ้ำลอยแกลบมีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์ที่ pH 8 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 150 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมสูงสุดประมาณร้อยละ 70 และ 98 ตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ้ำลอยไม้ยางพาราและถ้ำลอยแกลบ พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ ด้วยค่า R^2 0.8828 และ 0.5355 ตามลำดับ ทั้งนี้ถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิดไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (pilot model) จากผลการศึกษาเลือกใช้ถ้ำลอยไม้ยางพารา (RBFA) ควบคุมสภาวะที่ pH 7 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง ความเร็วในการกวนผสม 90 รอบต่อนาที โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 50 กรัมต่อลิตร เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อมสูงกว่าถ้ำลอยแกลบ (RFA) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าร้อยละ 60 และเมื่อผ่านการกรองทรายแบบกรองช้าทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยร้อยละ 95.82 ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำโรงงานอุตสาหกรรมทุกพารามิเตอร์

61311201 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : Fly ash, Adsorption, Dyestuff, Batik wastewater

MISS KAMONRAT KLIANGPRADITH : BATIK WASTEWATER ADSORPTION BY BIOMASS POWER PLANT FLY ASH THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR PORNTHIP SRIDANG

The objective of this research is to study the factors affecting the efficiency and optimum conditions for adsorption of organic matter, dyestuff, and heavy metals by rubber wood fly ash (RBFA) and rice husk fly ash (RFA) for pH, size of fly ash, contact time and fly ash dose. The optimum condition results were set up to study in a large set of experiments. The batch experiment results showed that rubber fly ash and rice husk fly ash affected on the adsorption efficiency of COD and dyestuff removal. The optimum conditions, pH 7, the total size of fly ash (no sieve), 16 hours of contact time and 100 grams per liter of fly ash dose, were obtained. The highest efficiency in COD and dyestuff adsorption was approximately 96% and 98%, respectively. The adsorption equilibrium was stable after an 18-hour contact time, while rice husk fly ash was effective to COD and dyestuff adsorption at pH 8 with all sizes of fly ash, 2 hours of contact time and 150 gram per liter of fly ash dose. The highest efficiency of COD and dyestuff adsorption was approximately 70% and 98%, respectively. The isotherm adsorption of fly ash, rubber wood and rice husk fly ash were found to be consistent with the Freundlich and Langmuir isotherms with R^2 0.8828 and 0.5355, respectively. Two types of fly ash studied could not adsorb Pb Fe Mn and Zn from dye struff wastewater.

In the pilot model of a wastewater treatment from batik production process, the rubber wood fly ash was selected and controlled at pH 7 with all sizes of fly ash. The operating conditions were set at 16 hours of contact time and 90 rpm of stirring speed, by using 50 grams per liter of fly ash as it has higher efficiency in organic and dyestuff removal than rice husk fly ash (RFA). The results showed that the treatment efficiency was higher than 60%. In addition, using the slow sand filtration increased an average treatment efficiency of 95.82%, the filtrated effluent could pass the quality standard of department of industrial works, Thailand in terms of pH TSS TDS

Turbidity and COD.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พรทิพย์ ศรีแดง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้โอกาส และคอยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อุมารัจน์ สันติสุขเกษม ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลิตา สุวรรณ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าอย่างยิ่งในการให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.นฤมล ทองมาก ที่สนับสนุนและประสานงานการส่งตัวอย่างถั่วงอกเขียวมวล ตัวอย่างสีย้อม และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก ขอขอบพระคุณผู้อนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ โรงไฟฟ้าชีวมวลไม้ยางพารา จังหวัดยะลา บริษัท ธีญญกิจ นครปฐม (2521) จำกัด และอุตสาหกรรมครัวเรือนผ้าบาติก จังหวัดยะลา ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการ เครื่องมือวิจัย บุคลากร เจ้าหน้าที่ และนักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความร่วมมือในการประสานงานต่าง ๆ รวมทั้งน้องนักศึกษาปริญญาตรีทุกคนที่มีส่วนร่วมและสนับสนุนระหว่างการดำเนินวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณกำลังใจและการสนับสนุนจากคุณแม่อรทัย พุ่มน่วม ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และคอยช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การดูดซับ.....	4
2.1.1 กระบวนการดูดซับ.....	4
2.1.2 ประเภทของการดูดซับ.....	4
2.1.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ.....	6
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	7
2.1.4.1 ปัจจัยทางกายภาพ.....	7
2.1.4.2 ปัจจัยทางเคมี.....	7
2.1.5 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	8
2.1.5.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	9

2.1.5.2	ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm).....	9
2.1.6	วัสดุดูดซับชีวมวล	10
2.1.7	ถ้ำลอย	11
2.1.7.1	ถ้ำลอยแกลบ.....	12
2.1.7.2	ถ้ำลอยไม้ยางพารา.....	13
2.1.7.3	ถ้ำลอยชานอ้อย	14
2.2	น้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก.....	14
2.2.1	สีย้อม	16
2.2.1.1	สีย้อมธรรมชาติ.....	17
2.2.1.2	สีย้อมสังเคราะห์.....	18
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3	วิธีดำเนินวิจัย	28
3.1	วัตถุประสงค์	28
3.2	อุปกรณ์.....	28
3.3	ขั้นตอนการดำเนินวิจัย.....	29
3.3.1	ศึกษาลักษณะน้ำตัวอย่างจากกระบวนการผ้าบาติกและสีย้อมสังเคราะห์	29
3.3.2	การคัดขนาดและการเตรียมถ้ำลอย	30
3.3.3	การศึกษาคุณสมบัติถ้ำลอย.....	30
3.3.4	การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีย้อมด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	32
3.3.4.1	ทดสอบผลช่วงค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ	32
3.3.4.2	ทดสอบขนาดของถ้ำลอยที่มีผลต่อการดูดซับ	32
3.3.4.3	ทดสอบระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับ.....	32
3.3.4.4	ทดสอบปริมาณถ้ำลอยที่มีผลต่อการดูดซับ	33

3.3.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาร่วมกับไอโซเทอมการดูดซับ	33
3.3.6 ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ COD และสีของแฉ่ำลอยแกลบ	33
3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยแฉ่ำลอยจาก โรงไฟฟ้าชีวมวล ขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (pilot model).....	38
3.3.8 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยแฉ่ำลอย จากโรงไฟฟ้าชีวมวลด้วยชุดทดลองขนาดใหญ่ (Pilot model).....	39
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	41
4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกและสีย้อมสังเคราะห์	41
4.2 คุณสมบัติของแฉ่ำลอย	42
4.3 ผลของสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD และสีด้วยแฉ่ำลอย	46
4.3.1 ผลของ pH	46
4.3.2 ผลของขนาดแฉ่ำลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	47
4.3.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	49
4.3.4 ผลของปริมาณแฉ่ำลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	51
4.4 ผลของไอโซเทอมการดูดซับ	52
4.5 สรุปผลของสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD และสีด้วยแฉ่ำลอย..	54
4.6 ผลศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยแฉ่ำลอยจาก โรงไฟฟ้าชีวมวลโดยขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (Pilot model)	55
4.6.1 ลักษณะน้ำเสีย.....	55
4.6.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด	55
4.6.2.1 น้ำสีย้อมสังเคราะห์	55
4.6.2.2 น้ำจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก	59
4.6.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย	62
4.6.4 สรุปผลของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยแฉ่ำลอย จากโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (Pilot model).....	63

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 65

 5.1 สรุปผลการศึกษา 65

 5.2 ข้อเสนอแนะ 66

รายการอ้างอิง 67

ภาคผนวก ก 74

ประวัติผู้เขียน 78



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี.....	5
ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของถ่านลอย.....	12
ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของแกลบข้าว	13
ตารางที่.4 สีธรรมชาติที่มาจากพืชและสัตว์	17
ตารางที่ 5 การจำแนกสีย้อมสังเคราะห์ตามลักษณะการใช้งาน	18
ตารางที่ 6 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม	19
ตารางที่.7 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์	30
ตารางที่ 8 ทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีย้อมด้วยถ่านลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล	37
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์และความถี่สำหรับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างขณะเดินระบบ	39
ตารางที่ 10 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก	44
ตารางที่ 11 ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านลอย	45
ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน	58
ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก.....	61
ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.....	63

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ.....	6
รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับ ตามการจำแนกของ IUPEC.....	8
รูปที่ 3 กระบวนการผลิตผ้าบาติก	16
รูปที่ 4 การคัดขนาดถ้ำลอย	31
รูปที่ 5 ชุดทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีย้อม.....	34
รูปที่ 6 แบบจำลองการดูดซับและกรองทรายเพื่อบำบัดน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติก.....	40
รูปที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอย	46
รูปที่ 8 ผลของ pH ต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์.....	47
รูปที่ 9 ขนาดถ้ำลอยต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์	49
รูปที่ 10 เวลาสัมผัสต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์.....	50
รูปที่ 11 ปริมาณถ้ำลอยต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์	52
รูปที่ 12 ไอโซเทอมแลงเมียร์ต่อการดูดซับ COD ของถ้ำลอย RBFA และ RFA	53
รูปที่ 13 ไอโซเทอมฟรุนดิชต่อการดูดซับ COD ของถ้ำลอย RBFA และ RFA.....	53
รูปที่ 14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์	56
รูปที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผ้าบาติกมีการผลิตกันอย่างแพร่หลายในจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยได้รับการสนับสนุนและพัฒนาจนเป็นอาชีพอย่างต่อเนื่อง การผลิตผ้าบาติกมีลักษณะการผลิตทั้งแบบโรงงานอุตสาหกรรมและแบบอุตสาหกรรมครัวเรือน กระบวนการผลิตผ้าบาติกประกอบด้วย การเตรียมผ้า การเตรียมเทียน การเขียนเทียน การย้อมสี การเคลือบน้ำยาโซเดียมซัลไฟด์ การลอกเทียน การตากผ้า และตกแต่งผ้า ซึ่งขั้นตอนในกระบวนการผลิตผ้าบาติกก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย เช่น ขั้นตอนการลอกเทียน ขั้นตอนการล้างสีย้อมออกจากผ้า ลักษณะของน้ำเสียมีค่าซีโอดี (COD) สูง $2,334.00 \pm 290.36$ มิลลิกรัมต่อลิตร (Siddiqui, Wahid, & Sakinah, 2011) มีการปนเปื้อนสีย้อม ซึ่งสีย้อมเป็นอนุภาคเม็ดสีที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ เมื่อมีการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำทำให้น้ำมีความสกปรกและมีปริมาณสารอินทรีย์สูงในรูปของ COD ปริมาณสารแขวนลอย ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและทัศนวิสัยของผู้พบเห็น อีกทั้งสีย้อมบางชนิดอาจมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ เช่น ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) และทองแดง (Cu) เป็นต้น หากมีการถ่ายโอนออกไปสู่สิ่งแวดล้อมสามารถสะสมอยู่ได้ทั้งร่างกายของมนุษย์ สัตว์น้ำ แหล่งน้ำ และสามารถสะสมอยู่ในดินได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตามโลหะหนักไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้และมีแนวโน้มมักสะสมในสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว มีพิษส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทส่วนปลาย ไต ระบบทางเดินอาหาร ระบบหัวใจและหลอดเลือด (กุลธิดา ถาวรกิจการ และกิจชัย ศิริวัฒน์, 2532) ดังนั้นการกำจัดหรือลดปริมาณสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมียหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี เช่น การตกตะกอนผลึกทางเคมี (chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรน (membrane filtration) การสร้างและรวมตะกอน (coagulation and flocculation) การทำให้ตะกอนลอย (flotation) การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical treatment) การดูดซับ (adsorption) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น การควบคุมอุณหภูมิ ระยะเวลา ระดับอัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสีย

ที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนัก เนื่องจากกระบวนการดูดซับมีความยืดหยุ่นในการออกแบบและดำเนินงาน ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพสูง วัสดุดูดซับหรือตัวดูดซับ (adsorbent) ที่ใช้งานในการกำจัดสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนัก ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ถ้ำลอยขานอ้อย ถ้ำลอยถ่านหิน แกลบ และซีโอไลต์ เป็นต้น (วารินทร์ พิมพา และจักรกฤษณ์ พิมพา, 2557)

ถ้ำลอยเป็นหนึ่งในวัสดุดูดซับที่มีความพรุน พื้นที่ผิว ส่วนประกอบทางเคมี เช่น ออกไซด์ของซิลิกา แคลเซียม และอลูมิเนียม ที่เหมาะสมในการใช้บำบัดน้ำเสียและยังมีต้นทุนที่ต่ำ ดังนั้นจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งของการนำวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวจากโรงไฟฟ้าถ่านหินหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล มาเป็นวัสดุดูดซับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก ซึ่งนอกจากลดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดออกสู่สิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและนำของเสียที่เกิดขึ้นกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากแหล่งของถ้ำลอยต่างกัน คุณสมบัติและส่วนประกอบทางเคมีของถ้ำลอยก็ต่างกัน จึงต้องทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของถ้ำลอยนั้น

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาสัมผัส ขนาดของถ้ำลอย ปริมาณของถ้ำลอย ในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดด้วยถ้ำลอยไม้ยางพาราและถ้ำลอยแกลบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

(1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

(2) เพื่อขยายผลโดยใช้ชุดการทดลองขนาดใหญ่บำบัดน้ำเสียจากน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยไม้ยางพาราและถ้ำลอยแกลบ และนำข้อมูลมาขยายผลโดยใช้ชุดการทดลองขนาดใหญ่ระดับห้องปฏิบัติการในรูปแบบของถังปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถ้ำลอยในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติก ซึ่งสามารถสรุปขอบเขตการวิจัยดังนี้

(1) การวิจัยนี้ใช้ชุดทดสอบกระบวนการเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ผ่านการทดลองด้วยวิธีแบบกะ (batch method) สภาวะที่ทดสอบ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาสัมผัส ขนาดของถ้ำลอย และปริมาณของถ้ำลอยที่ใช้ในการดูดซับ

โดยการกวนผสมที่อุณหภูมิของน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) แล้ววิเคราะห์หาค่า COD (open reflux) สีย้อม (colorimetry) และโลหะหนัก (graphite furnace atomic absorption spectrometry; GFAAS) เพื่อนำไปกำหนดสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนัก ซึ่งสถานะที่ทดสอบชุดการทดลองต่าง ๆ สรุปไว้ในหัวข้อวิธีการดำเนินการวิจัย

(2) ใช้ชุดทดลองระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย ถังพักน้ำขนาดปริมาตรประมาณ 20 ลิตร ถังปฏิกรณ์พร้อมกับอุปกรณ์กวนผสมขนาดปริมาตรประมาณ 20 ลิตร ระบบปั๊มสูบลำน้ำเสียเข้าระบบ ชุดกรองทรายแบบกรองช้า ขนาดทรายประมาณ 0.1-0.80 มิลลิเมตร และถังรับน้ำหลังบำบัด ดำเนินการโดยใช้ผลจากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมจากข้อ (1) มาทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ขณะเดินระบบบำบัดดำเนินการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างด้วยพารามิเตอร์ ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของแข็งทั้งหมดที่แขวนลอย (TSS) ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS) ความขุ่น (Turbidity) ซีโอดี (COD) และสีย้อม ซึ่งรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition (Rive, Baird, & Eaton, 2017) สรุปไว้ในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

(1) ได้รูปแบบสถานะและประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียผ้าบาติกโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

(2) ผลการวิจัยที่ได้เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตผ้าบาติกเพื่อใช้เป็นแนวทางหรือรูปแบบในการกำจัดสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดซับ

2.1.1 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ (adsorption process) คือ กระบวนการดูดซับสารละลายหรือสารแขวนลอย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารจากการดูดติดหรือผสมในโมเลกุลสารที่ต้องการระหว่างสถานะในวัฏภาคของไหล ได้แก่ แก๊ส (gas) ของเหลว (liquid) และของแข็ง (solid) โดยสารละลายที่ต้องการแยก เรียกว่า ตัวถูกดูดซับหรือสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวภายในซึ่งทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับหรือสารดูดซับ (adsorbent) การดูดติดของโมเลกุลสารถูกดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณโพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของสารดูดซับที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2.1.2 ประเภทของการดูดซับ

ประเภทของการดูดซับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งอาศัยแรงดึงดูดไฟฟ้า เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) และการดูดซับทางเคมี อาศัยแรงดึงดูดระหว่างพันธะของโมเลกุล ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

(1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อน ๆ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ซึ่งจัดเป็นแรงดึงดูดที่อ่อนทำให้การดูดซับมีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างต่ำ การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่าย สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้และการดูดซับเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยจำนวนชั้นที่ซ้อนทับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ โดยจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

(2) การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่อาศัยการสร้างพันธะระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับและแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ โดยพันธะเคมีเป็นพันธะที่แข็งแรงทำให้มีความร้อนของการดูดซับสูง การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากพื้นผิวจึงทำได้ยากและการดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

ตารางที่ 1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
สภาพจำเพาะการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่งสามารถดูดซับสารละลายได้หลายชนิด)	มีความจำเพาะสูง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นอยู่กับสภาพของสารเคมีพื้นผิว)
ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นและไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้นและอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับได้
อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ถึงแม้ว่าจะเกิดสภาพมีขั้วของสารถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ
สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานการกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับ และมีพลังงานกระตุ้นการดูดซับสูง
อัตราเร็วการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

ที่มา : ดัดแปลงจากชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2550)

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปเกาะผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกระบวนการที่เกิดอย่างรวดเร็วโดยเกิดจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ

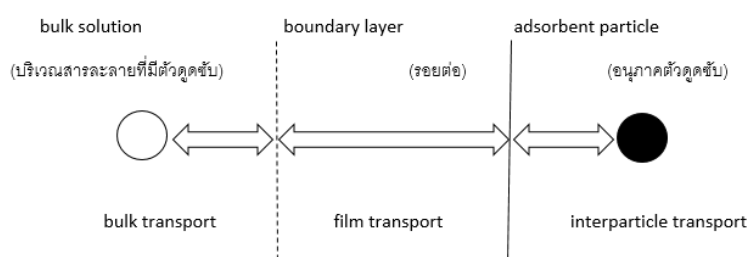
2.1.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการดูดซับ หากอัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็วทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วยิ่งขึ้น ขั้นตอนที่ยาวที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย (รูปที่ 1) ดังนี้

(1) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกส่งไปยังผิวหน้าของชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด

(2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลบนผิวหน้าของชั้นของเหลวแพร่ผ่านฟิล์มน้ำและแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับจัดเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ

(3) การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดการดูดซับขึ้นภายในของตัวดูดซับ เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ (2550)

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.1.4.1 ปัจจัยทางกายภาพ

(1) อัตราเร็วในการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ film diffusion และ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (สันทัด ศิริอนันต์ไพบุรณ์, 2549; Faust and Aly, 1987)

(2) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดของสารดูดซับเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับคือ ตัวดูดซับขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการถูกดูดซับสูง พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งพื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น ดังนั้นหากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวและมีรูพรุนมากความสามารถในการดูดซับจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Ginosar, Petkovic, & Burch, 2011)

(3) อุณหภูมิ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้สมดุลของการดูดซับเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ทำให้เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น (อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์, 2559)

(4) เวลาที่ได้รับสัมผัส เวลาที่สัมผัสในกระบวนการดูดซับเป็นพารามิเตอร์สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ หากใช้เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและอายุการใช้งานของการดูดซับแบบต่อเนื่อง (มันสิน ตันสกุลเวศม์, 2538)

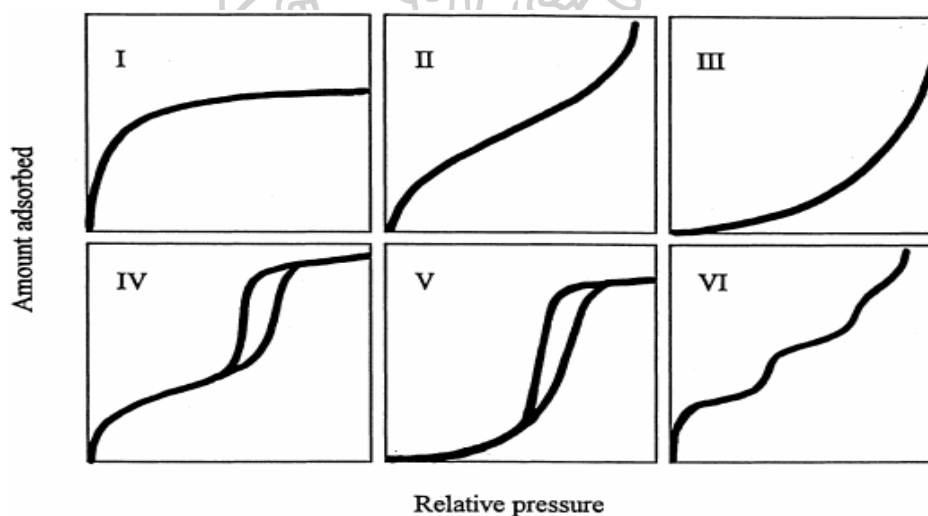
2.1.4.2 ปัจจัยทางเคมี

(1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ถ้าความเข้มข้นของกรดลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมากขึ้น เพราะเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นและมีความสามารถในการเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดีทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้วค่อนข้างมีประจุเล็กน้อยจึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ตัวอย่างเช่น การดูดซับ 4-คลอโรฟีนอล (4-CP) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-DCP) ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) ความสามารถในการดูดซับของสารประกอบคลอโรฟีนอล กากตะกอนขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย โดยการดูดซับ 4-คลอโรฟีนอล (4-CP) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-DCP) เพิ่มขึ้นเมื่อ pH ลดลง (Ruiying and Jianlong, 2007)

(2) ความมีขี้ของโมเลกุล ความมีขี้ของโมเลกุลมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสาร หากความมีขี้สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง คือสารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวได้มีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้ดีจึงเกิดการดูดซับได้น้อย ส่วนสารที่ไม่มีความสามารถในการละลายหรือมีความสามารถในการละลายได้น้อย สามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่า (อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์, 2559)

2.1.5 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) คือการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว ณ อุณหภูมิและความดันคงที่ในรูปของกราฟ ซึ่งสามารถอธิบายกลไกและกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในโพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายประเภท แตกต่างกันตามชนิดของสารถูกดูดซับ ซึ่งปัจจุบันมีประเภทของไอโซเทอมทั้งหมด 6 ประเภท ตามการจัดจำแนกของ IUPAC ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับ ตามการจำแนกของ IUPAC

ที่มา: Brunauer, Deming & Teller (1938)

ไอโซเทอมที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์สมดุลการดูดซับ คือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และ ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

2.1.5.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอมของแลงเมียร์ เป็นไอโซเทอมแบบง่ายที่ใช้แสดงความสัมพันธ์การดูดซับ โดยมีสมมติฐานคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน มีการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) และไม่สามารถย้ายข้ามไปยังพื้นที่ผิวข้างเคียง พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ จากสมมติฐานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1)–(3) นี้

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

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (2)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} \quad (3)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุลหรือเรียกว่าค่าการดูดซับที่สมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/K_L q_m$ และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/q_m$ (Langmuir, 1918)

2.1.5.2 ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอมของฟรุนดิช เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ นิยมใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์การดูดซับ เนื่องจากมีความแม่นยำสูง มีสมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) จากสมมติฐานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (4)–(5)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (5)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุลหรือเรียกว่าค่าการดูดซับที่สมดุล

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e)$ และ $\log(C_e)$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\log(K_F)$ โดยถ้าความชันมีค่ามาก ($1/n > 1$) แสดงว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับมีปริมาณมาก หากมีค่าความชันมีค่าน้อย ($1/n < 1$) แสดงว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับมีปริมาณจำกัดและหากค่าความชัน $1/n = 1$ แสดงว่าไอโซเทอมของการดูดซับนั้นเป็นแบบเส้นตรง (Freudlich, 1906)

2.1.6 วัสดุดูดซับชีวมวล

วัสดุดูดซับ คือ สารหรือวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้มีหลายชนิด เช่น วัสดุดูดซับจากสารอินทรีย์ ถ่านกัมมันต์ วัสดุดูดซับสังเคราะห์ และวัสดุดูดซับสารอินทรีย์ชีวมวลเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีจำนวนมาก ชีวมวลแบ่งตามแหล่งที่มาดังนี้

(1) พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เช่น ชานอ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมทั้งพืชน้ำมันต่าง ๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้

(2) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) เช่น ฟางข้าว ลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

(3) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระจับปี่ ไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

(4) ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (waste streams) เช่น กากน้ำตาลและชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ขี้เลื่อย เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม เป็นต้น

ทั้งนี้ปริมาณของชีวมวลมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศที่เกิดขึ้น ซึ่งการนำไปใช้ประโยชน์ก็ขึ้นอยู่กับคุณค่าและคุณสมบัติของชีวมวลแต่ละชนิด บางชนิดไม่เหมาะนำมาเป็นชีวมวล เนื่องจากความชื้นค่อนข้างสูงและต้นทุนในการผลิตสูง พิรภพ จอมทอง (2559) กล่าวว่าในประเทศไทยได้มีการศึกษาและวิจัยเทคโนโลยีต่าง ๆ ในด้านการแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานชีวมวล เพื่อให้ได้พลังงานทดแทนที่จะนำมาใช้ได้อย่างเพียงพอ โดยโรงไฟฟ้าชีวมวลประเภทการสันดาปหรือการเผาไหม้จะเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือของเหลือทางกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น แกลบ ชานอ้อย ใบอ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม เศษไม้ ฯลฯ มาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดเถ้า โดยเถ้าที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น เถ้าหนัก (bottom ash) ร้อยละ 80 และเถ้าลอย (fly ash) ร้อยละ 20 (ณิชา บุรณสิงห์, 2560) โดยเถ้าลอยมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดซับ เนื่องจากเถ้าลอยมีรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมาก มีความแข็งแรง และเกาะติดยึดได้ดี จึงเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดซับ ส่วนเถ้าหนัก เป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็ง มีน้ำหนัก ขนาดใหญ่ มีความชื้นสูง และมีรูพรุนน้อยกว่าเถ้าลอย การนำมาใช้จึงต้องมีการปรับปรุงขนาดและกำจัดความชื้น จึงเป็นที่นิยมนำมาเป็นวัสดุอุดซับน้อยกว่าเถ้าลอย แต่มักนิยมใช้เป็นวัสดุประสานด้วยการผสมในคอนกรีต (ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, 2556)

2.1.7 เถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash) เป็นกากหรือผลพลอยได้จากการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยใช้เชื้อเพลิงจำพวกชีวมวลและถ่านหิน เมื่อเชื้อเพลิงถูกปดและเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ เถ้าขนาดเบาจะถูกพัดพาออกตามอากาศและถูกกำจัดโดยอุปกรณ์ควบคุมการปล่อยอนุภาค เรียกว่า electrostatic precipitator เพื่อไม่ให้เกิดมลพิษฝุ่นละอองรอบโรง เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 300 ไมครอน น้ำหนักเบา มีสีเทาปนน้ำตาล เถ้าลอยจากชีวมวลมีส่วนประกอบหลัก คือ ซิลิกา อลูมินาออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เป็นต้น ส่วนประกอบดังกล่าวจะแตกต่างกันตามปริมาณของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

ส่วนประกอบ ของเถ้าลอย	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	แกลบ (ภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ, 2547)	ยางพารา (อาบีเต็ง ฮาวา, 2551)	ชานอ้อย (Patil et al., 2018)
ซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂)	88.280	2.57	79.82
คาร์บอน (C)	6.004	-	-
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.049	0.56	1.09
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	2.540	41.19	2.04
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.270	4.52	1.98
โซเดียมออกไซด์ (NaO ₂)	0.134	-	-
โพแทสเซียมไดออกไซด์ (K ₂ O)	3.300	16.11	3.82
แมงกานีสออกไซด์ (MnO ₂)	0.225	1.36	0.04
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	0.005	-	-
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	0.010	-	-
อลูมินัมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	-	0.53	1.88
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	-	0.54	0
ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P ₂ O ₅)	-	3.06	1.36
คลอรีน (Cl)	-	0.82	-
รูบิเดียม (Rb)	-	0.18	-
สตรอนเซียมออกไซด์ (SrO)	-	0.16	-

2.1.7.1 เถ้าลอยแกลบ

แกลบ เป็นวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือก มีลักษณะ เป็นเปลือกแข็ง ผิวหยาบ เปลือกแยกเป็นสองฝาประกบห่อหุ้มเมล็ดข้าว จากข้อมูลการประเมินศักยภาพชีวมวลจากเศษวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 พบว่าประเทศไทยมีชีวมวลจากแกลบมากถึง 8,974,554 ตันต่อปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) โดยแกลบมีส่วนประกอบทางเคมีหลายชนิด เช่น ซิลิกา เซลลูโลส โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น (ตารางที่ 3) จากงานวิจัยของ สันติ รัตนวีรนนท์ (2547) พบว่า แกลบประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 21.72 และไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 75.06 และเมื่อผ่านการเผาเป็นเชื้อเพลิง พบว่า เถ้าแกลบมีซิลิกาเป็น

ส่วนประกอบหลัก มากกว่าร้อยละ 80 และ พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี และคณะ (2557) กล่าวถึง คุณสมบัติเด่นของแกลบคือ แกลบมีความชื้นต่ำ มีพื้นผิวสูงและรูพรุนขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังมี น้ำหนักหนักเบา และ Pengthamkeerati, Satapanajaru, & Singchan (2008) พบว่า แกลบออกจาก ชีวมวลมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 91.05 โดยซิลิกามีคุณสมบัติในการดูดซับ เป็นส่วนประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีรูพรุนมาก ทำให้แกลบมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของแกลบข้าว

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
โปรตีน	1.9-3.0
ไขมัน	0.3-0.8
เยื่อใย	34.5-45.9
คาร์โบไฮเดรต	26.5-29.8
เถ้า	13.2-21.0
ซิลิกา	18.8-22.3
แคลเซียม	0.6-1.3
ฟอสฟอรัส	0.3-0.7
ลิกนิน	9.0-20.0
เซลลูโลส	28.0-36.0
เพนโตซาน	21.0-22.0
เฮมิเซลลูโลส	12.0
ส่วนที่สามารถย่อยได้	9.3-9.5

ดัดแปลงจาก : งามชื่น คงเสรี (2546)

2.1.7.2 แกลบอ้อย่างพารา

ยางพารา เป็นไม้ยืนต้นที่มีขนาดใหญ่ที่นิยมนำมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เศษไม้ยางพาราที่เหมาะสมในการเป็นชีวมวล คือ ปลายไม้ยางพาราที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 6 นิ้ว นอกจากนี้ส่วนที่เป็นปีกไม้สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี (อณวัชร ชำนาญโชติ, 2560) จากผลการตรวจแกลบอ้อย่างพาราของ อานีเต็ง ฮาวา (2551) พบว่า ลักษณะของแกลบอ้อย่างพารามีสีน้ำตาลเข้ม บางส่วนจับเป็นก้อน โดยมีส่วนประกอบของ CaO ร้อยละ 41.19 เป็นส่วนประกอบหลัก และมี SiO₂ Al₂O₃ และ Fe₂O₃

รวมกันเท่ากับร้อยละ 3.66 จากส่วนประกอบข้างต้นถ้าลอยไม่ยางพาราสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุ
ดูดซับได้

2.1.7.3 แก้วลอยขานอ้อย

แก้วลอยขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการนำขานอ้อยไปเผาเป็นเชื้อเพลิง ในปี
พ.ศ. 2560 พบว่า ประเทศไทยมีขานอ้อยเกิดขึ้นเท่ากับ 65,526,016 ต้นต่อปี (กรมพัฒนาพลังงาน
ทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) โดยแก้วลอยขานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 มีปริมาณสูง
และส่วนใหญ่ไม่เป็นผลึก โดยจากการศึกษาวิจัยของ Gupta, Jain, Ali, Sharma, & Saini (2003)
พบว่าแก้วลอยขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลได้ร้อยละ 90 ซึ่งงานวิจัยนี้
ชี้ให้เห็นว่าแก้วลอยขานอ้อยสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับได้ดี

2.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

ผ้าบาติก เป็นการผลิตผ้าที่เก่าแก่ ซึ่งได้รับความนิยมในจังหวัดต่าง ๆ ของภาคใต้ เมื่อปี
พ.ศ. 2518 กรมส่งเสริมอุตสาหกรรมได้ริเริ่มการส่งเสริมอาชีพใหม่ โดยเปิดฝึกอบรมการผลิตผ้าบาติก
ระบายมือหรือบาติกเขียนมือ (batik tulis) ให้แก่ชาวบ้านในจังหวัดภูเก็ต (บุญชัย ธรรมดิระวุฒิ,
2552) จึงทำให้ผ้าบาติกเป็นที่รู้จักกันและนิยมกันมากขึ้นจนเกิดอุตสาหกรรมทำผ้าบาติก

การผลิตผ้าบาติกประกอบด้วย การเตรียมผ้า การเตรียมเทียน การเขียนเทียน การย้อมสี
การเคลือบน้ำยาโซเดียมซิลิเกต การลอกเทียน การตากผ้า และตกแต่งผ้า (พิเชษฐ์ หนูหมื่น, 2557)
ดังรูปที่ 3 โดยน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกจะมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ สีย้อม และ
โลหะหนัก โดยขึ้นอยู่กับประเภทหรือชนิดของสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการผลิต จากงานวิจัยของบุญชัย
ธรรมดิระวุฒิ (2552) สามารถอธิบายกระบวนการในการผลิตผ้าบาติกโดยทั่วไปดังนี้

(1) การเตรียมผ้า ขั้นตอนนี้คือ การเลือกชนิดของผ้าให้เหมาะสม ผ้าที่นิยมนำมาใช้คือ
ผ้าที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ฝ้าย ปอ และผ้าไหม เป็นต้น ความหนาของผ้าไม่หนาหรือบางเกินไป
จากนั้นนำไปต้มด้วยน้ำด่างโซดาอ่อน (โซดาแอชหรือผงซักฟอก 1 กรัมต่อลิตร โซดาไฟ 1 กรัมต่อลิตร
สบู่เทียม (wetting agent) 1 กรัมต่อลิตร) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบนผ้าก่อน จากนั้นจึงบดไม้เฟรม

(2) การเตรียมเทียนหรือผสมเทียน โดยเทียนที่ใช้ได้จากการผสมระหว่างขี้ผึ้ง (wax)
และพาราฟิน (paraffin) ในอัตราส่วน 1:1 หรือ 1:2 การเขียนเทียนควรเริ่มจากบริเวณขอบผ้า เพื่อให้
แน่ใจว่าได้เส้นเทียนตามต้องการ

(3) การเขียนเทียน เป็นการปิดส่วนที่ไม่ต้องการให้สีติด ก่อนนำไปลงสีตามต้องการ
การเขียนเทียนด้วยชั้นดีทำให้เส้นเทียนมีเส้นขนาดเล็กและสามารถเขียนรายละเอียดได้มากขึ้น

(4) การย้อมสี เป็นการลงสีตามตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้สีผงสำเร็จแล้วสำหรับผ้าบาติก โดยใช้อัตราส่วนสีต่อน้ำอุ่นเท่ากับ 2 ชั้นหนา:10 ชั้นโน้ตะ การละลายสีควรใช้น้ำอุ่นเพื่อให้สีละลายได้มากขึ้นและไม่เป็นตะกอน

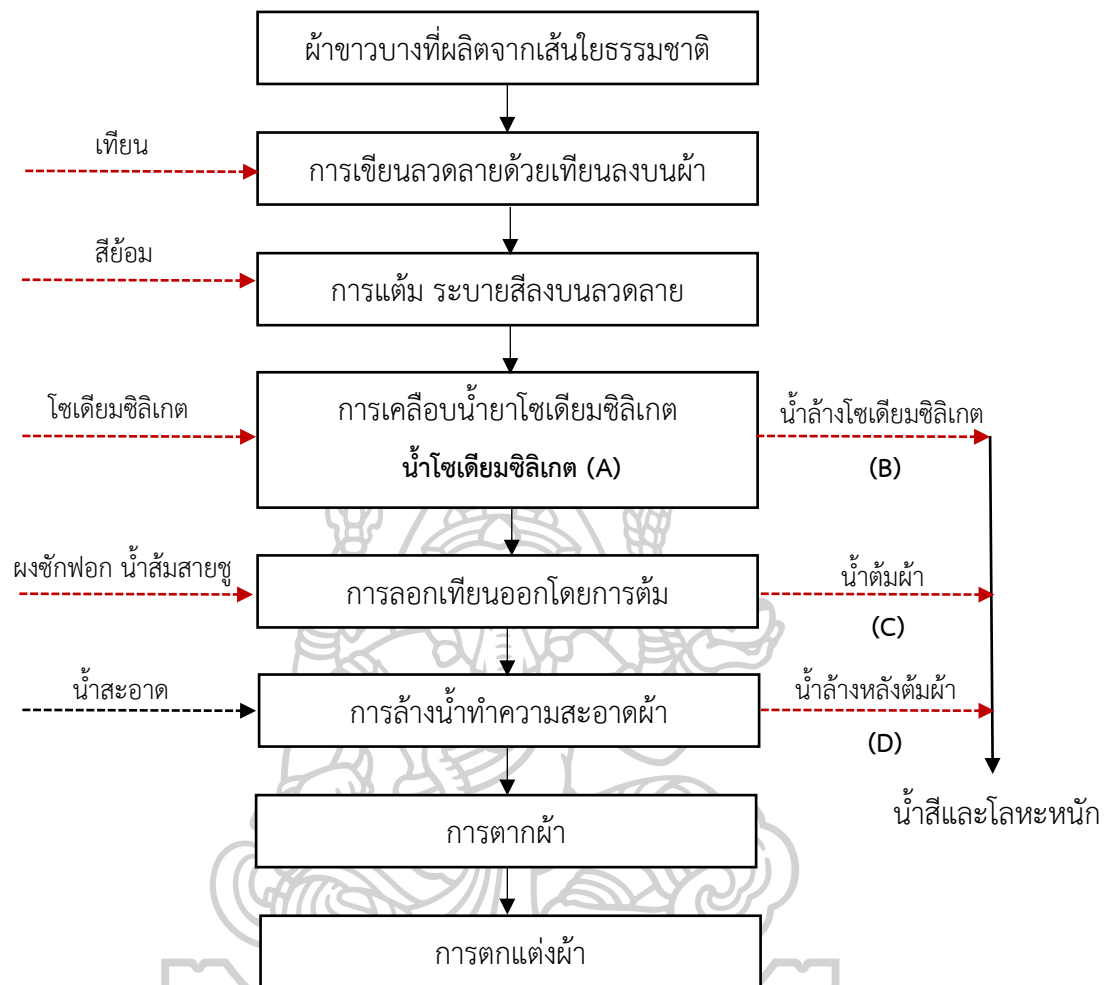
(5) การเคลือบโซเดียมซิลิเกต เป็นขั้นตอนการทำให้ผ้าติดสีอย่างถาวร โดยใช้ฟู่กันทาหรือระบายให้ทั่ว แล้วทิ้งไว้ 3-6 ชั่วโมง และนำผ้าไปล้างโซเดียมซิลิเกตออก

(6) การลอกเทียน เป็นวิธีการลอกเทียนโดยการต้มผ้าที่ผ่านการล้างวิธีข้างต้นในน้ำเดือดที่มีผงซักฟอก ประมาณ 1 ชั้นโน้ตะ ในน้ำ 1 ลิตร เวลา 30-40 นาที แล้วค่อย ๆ ยกขึ้นมา ขั้นตอนนี้ทำให้ผ้าบาติกมีคุณภาพดีสีไม่ตก ไม่ควรแช่นานเกินไปจะทำให้ผ้าเสียได้

(7) การตากผ้า บิดน้ำออกจากผ้าพอสมควร ๆ ด้วยมือหรือใช้เครื่องซักผ้าปั่นแล้วนำไปตาก โดยตากออกทั้งผืน ไม่ควรวางซ้อนทับกัน ควรตากไว้ในที่ร่มหรือผึ่งแดด เมื่อแห้งให้รีบเก็บหากปล่อยไว้นานอาจทำให้สีซีดได้

(8) การตกแต่งผ้า เป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยการเก็บรายละเอียดของชิ้นงาน เช่น การรีด การอัด การตกแต่งผิวผ้า เพื่อเป็นการดึงดูดใจลูกค้า





รูปที่ 3 กระบวนการผลิตผ้าบาติก

ที่มา: ดัดแปลงจากพิเชษฐ์ หนูหมื่น (2557)

2.2.1 สีย้อม

สีย้อม (dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า ซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ แต่บางชนิดไม่สามารถละลายในน้ำแต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมต่างกัน แสงที่สายตามองเห็นได้จะมี ความยาวคลื่น

ช่วง 400–700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกัน แสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาสถาออกมาเป็นต่างสีกันไป (ชนิษฐา ชัยรัตน์วารรณ, 2550ก) สีย้อมสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ 2 แบบ ได้แก่ คือ สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) และสีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs) สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนของลำต้น ดอก เปลือกไม้ และใบ เป็นต้น ส่วนสีย้อมสังเคราะห์เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี (ชนิษฐา ชัยรัตน์วารรณ, 2550ข)

2.2.1.1 สีย้อมธรรมชาติ

สีธรรมชาติ คือ สีที่สกัดได้จากแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติโดยเฉพาะพืชและแมลงบางชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4 สีย้อมที่ได้จากพืช ได้แก่ ลำต้น ดอก เปลือกและใบ เช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีย้อมจากสัตว์ ได้แก่ สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์ หนาม (พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์, 2555) การสกัดสีจากวัตถุดิบธรรมชาติมีวิธีการผลิตที่หลากหลายวิธีจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสวยงามและสีสันทที่หลากหลาย

ตารางที่.4 สีธรรมชาติที่มาจากพืชและสัตว์

แหล่งวัตถุดิบของสีธรรมชาติ	ส่วนที่ให้สี	สีที่ได้
ยอ	ราก	แดง
ดาวเรือง	ดอก	เหลือง
ฝาง	แก่น, ราก, ฝัก	บานเย็น, ชมพู, แดงเลือดหมู, เหลือง
โกก่าง	เปลือกไม้	น้ำตาล
ครั่ง (แมลง)	ตัว	แดง
หว่า	ผล	ม่วงอ่อน
คราม	ต้น	น้ำเงิน
มะเกลือ	ผล	ดำ

ที่มา : ดัดแปลงจากศิริ ผาสุก (2535)

2.2.1.2 สีย้อมสังเคราะห์

เป็นสีย้อมที่เกิดจากการกระบวนการทางเคมี แบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามคุณสมบัติการละลายน้ำ ได้แก่ สีย้อม (dyes) ละลายน้ำได้ และพิกเมนต์ (pigments) ไม่ละลายน้ำ สีย้อมสังเคราะห์สามารถจำแนกตามวิธีการใช้เป็น 11 ประเภท ตามตารางที่ 5 ตารางที่ 5 การจำแนกสีย้อมสังเคราะห์ตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพ	พันธะหรือกลไก	ประเภทวัตถุที่ใช้ย้อม
	เคมี	การติดสี	
สีย้อมเอซิด	ประจุลบ สีดึดไม่แน่น	พันธะไอออนิก	เส้นใยโปรตีน ปอ ป่าน
สีย้อมซัลเฟอร์	ไม่ละลายน้ำ สีดึดแน่น	ตกผลึกในเส้นใย	เส้นใยเซลลูโลส ฝ้าย
สีย้อมไคเรนท์	ประจุลบ สีดึดไม่แน่น	พันธะไอออนิก	เส้นใยเซลลูโลส ฝ้าย วิสกอส
สีย้อมเบสิก	ประจุบวก ละลายน้ำได้	พันธะไอออนิก	เส้นใยโปรตีน ไนลอน
สีย้อมรีแอคทีฟ	ประจุลบ สีดึดแน่น	พันธะโควาเลนต์	เส้นใยเซลลูโลส ฝ้าย วิสกอส
สีย้อมดิสเพิร์ส	ไม่ละลายน้ำ สีดึดแน่น	การดูดซับ	ใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน
สีย้อมอะโซอิก	ไม่ละลายน้ำ สีดึดแน่น	ตกผลึกในเส้นใย	เส้นใยเซลลูโลส ไนลอน
สีย้อมแว้ต	ไม่ละลายน้ำ สีดึดแน่น	ตกผลึกในเส้นใย	เส้นใยเซลลูโลส
สีย้อมมอร์แดนท์	ไม่ละลายน้ำ	ตกผลึกในเส้นใย	เส้นใยโปรตีน
สีย้อมอินเกรน	ไม่ละลายน้ำ	การดูดซับ	ฝ้าย
สีย้อมออกซิเดชัน	ไม่ละลายน้ำ	ตกผลึกในเส้นใย	ฝ้ายและขนสัตว์

ที่มา : ดัดแปลงจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (บุญรัตน์ กาญจนวรรณิชย์, 2552)

จากวิจัยของสายรุ้ง นพขุนทด (2554) พบว่า ในขั้นตอนการย้อมสีเส้นใยมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงแค่บางส่วน สีย้อมที่เหลือมักอยู่ในสารละลายสีย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย โดยปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้ โดยสีที่มีความสามารถในการผนึกกับเส้นใยสูงจะมีปริมาณสีในน้ำเสียน้อยกว่าสีที่มีความสามารถในการผนึกกับเส้นใยต่ำกว่า

สีย้อมที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตผ้าบาติก คือ สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dye) เพราะสีย้อมรีแอคทีฟสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ ทำให้สีย้อมรีแอคทีฟติดอยู่บนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทนทานต่อการซักล้าง (กาวิ ศรีกุลกิจ, 2554) แต่ทั้งนี้สีย้อมรีแอคทีฟ นอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใยเซลลูโลสได้แล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียสีย้อมรีแอคทีฟบางส่วนไป เนื่องจากมีประจุลบ และสามารถละลายน้ำได้ (ลิลี โกศัยยานนท์, 2541) ซึ่งในอุตสาหกรรมหรือชุมชนผลิตผ้าบาติก ส่วนใหญ่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตปริมาณมากในการล้างชิ้นงาน ดังนั้นน้ำเสียผ่านการใช้จึงมีการปนเปื้อนสีย้อมและสารเคมีในการเคลือบผ้า โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2552) กล่าวว่าจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิต พบว่า น้ำเสียที่เกิดขึ้นมาจาก 2 แหล่งใหญ่ ได้แก่ น้ำเสียที่ได้จากการฟอกย้อม น้ำเสียส่วนนี้มีปริมาณน้อยแต่มีความเข้มข้นมาก และน้ำเสียจากการซักล้างหลังการฟอกย้อม น้ำเสียในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นน้อยกว่าส่วนแรก ดังนั้นเพื่อควบคุมการการปล่อยน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อม ได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 โดยน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีค่าดัชนีคุณภาพน้ำไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
pH	5-9
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)	ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี (BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียมไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารหนู (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : ดัดแปลงจากมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560)

ตารางที่ 6 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : ดัดแปลงจากมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์ (2538) ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านลอยิกไนต์ จากการศึกษาใช้สีย้อมในการทดลอง 7 ประเภท ได้แก่ สีแอสิต สีเบสิก สีรีแอคทีฟ สีซัลเฟอร์ สีไดเรกต์ สีดิสเพิร์ส และสีฟิสิกเมนต์ พบว่า การปรับเปลี่ยนค่า pH ของสารละลายในช่วง 4-8 ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านลอยิกไนต์มากนัก แต่สีแอสิตมีแนวโน้มถูกดูดซับดีเมื่อ pH มีสถานะเป็นกรด นอกจากนี้การศึกษาค่าของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำให้อยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย จะมีผลต่อการดูดซับเล็กน้อย สำหรับ COD นั้นเมื่อสีต่างชนิดกันจะมีค่า COD ต่างกัน เริ่มต้นอยู่ในช่วง 42-146 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้ถ่านลอยิกไนต์ในการดูดซับนั้นสามารถลดค่า COD อยู่ในช่วงร้อยละ 20.8-89.4 ของน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สกล ศิริรัตน์ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิกด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซานเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์แบบธรรมดา โดยสีย้อมที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Red 141 และ Basic Red 14 พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟได้ร้อยละ 83 ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์แบบธรรมดา ที่มีความสามารถในการดูดซับร้อยละ 75 และพบว่าค่า pH ของสารละลายสีย้อมมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบไคโตซาน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่ค่า pH เท่ากับ 5 7 และ 9 พบว่าเมื่อค่า pH 5 และ 9 ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น 1.18 และ 0.88 เท่าของค่า pH เท่ากับ 7

วรรณวิภา ผลาหาญ (2547) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 5 ชนิด ได้แก่ Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow ด้วยเศษผงเหล็ก ผลการศึกษา พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 5 ชนิด มีค่าเท่ากับ 0.006, 0.011, 0.007, 0.050 และ 0.012 มิลลิกรัมต่อกรัม ของสีย้อมทั้ง 5 ชนิด ตามลำดับ

พัชรินทร์ ตั้งควิเวชกุล (2549) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเหล็กและแมงกานีสด้วยถ่านที่เตรียมจากไมยราบยักษ์ ถ่านจากแกลบดำ Activated charcoal ไคโตซานมาตรฐานและไคโตซานจากกระดองปูนา จากการศึกษา พบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ Fe^{3+} ด้วยวัสดุดูดซับทั้ง 5 อยู่ในช่วง pH 2.0-3.5 สำหรับการดูดซับ Mn^{2+} ด้วยแกลบดำ ไมยราบยักษ์ และ Activated charcoal พบว่าสามารถดูดซับได้ดีที่ pH 4.5-6.0

พิเชษฐ์ หนูหมื่น (2557) ศึกษาการดูดซับสีในน้ำเสียจากกระบวนการทำผ้าบาติกด้วยอิฐมอญบด โดยใช้อิฐมอญบดคัดขนาด 3 ขนาด ได้แก่ 2.0 มิลลิเมตร 0.42-2.0 มิลลิเมตร และขนาดเล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตร เป็นวัสดุดูดซับ ผลการศึกษา พบว่า อิฐมอญขนาดเล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตรมีความสามารถในการดูดซับดีที่สุด และสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับพบว่า ที่ค่า pH ของน้ำทิ้งเป็นกลางดีกว่าสภาวะปกติของน้ำทิ้งที่มีค่าเป็นด่าง อัตราส่วนของอิฐมอญเท่ากับ 1:1 และมีความหนาไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร จึงจะเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักและกำจัดสิ่งสกปรกได้

พชรวรรณ อังศิริสวัสดิ์ (2559) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือกหน่อไม้แห้ง โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ค่า pH (3-9) เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (5-90 นาที) อัตราการเขย่า (100-300 รอบต่อนาที) ปริมาณตัวดูดซับ (0.10-0.30 กรัม) และความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (5-300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการศึกษา พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหน่อไม้แห้งมีค่า 29.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 7 เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.15 กรัม การดูดซับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 60 นาที เมื่อเขย่าสารผสมด้วยอัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที นอกจากนี้ พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมนี้ สอดคล้องกับแบบฟรุนดิช (R^2 0.988) แสดงว่าเปลือกหน่อไม้ที่ผ่านการอบแห้งนี้ สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งได้อย่างดี

รวินิภา ศรีมูล (2559) ศึกษาการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้วัสดุดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์และวัสดุดูดซับจากการเกษตร ได้แก่ ถ่านหิน กะลามะพร้าว กากถั่วเหลือง ชานอ้อย ชีลื้อย ไม้ไผ่ กากไบรอน เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ และถั่วลันเตา โดยตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมที่แตกต่างกันออกไป และพบว่ามียปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง เช่น สมบัติของตัวดูดซับ สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ ความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นของสารละลาย ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ และอุณหภูมิ ถ้าเป็นการดูดซับแบบคอลัมน์ต้องคำนึงถึงอัตราการไหลและระยะของชั้นดูดซับในคอลัมน์ด้วย ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพและพฤติกรรมการดูดซับทั้งสิ้น การเลือกใช้วัสดุดูดซับควบคู่ไปกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับช่วยให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี และช่วยลดปริมาณสีย้อมที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

สุพัตรา บุตรเสรีชัย และคณะ (2559) ศึกษาการใช้เถ้าลอยถ่านหินในการบำบัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยกระบวนการดูดซับ ผลศึกษาพบว่าการกำจัดสีของเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.5 1 1.5 และ 2 กรัม โดยมีค่าการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 76 86 90 และ 94 ตามลำดับ กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุลใช้เวลา 60 ชั่วโมง เมื่อเถ้าลอยถ่านหินผ่านการใช้งานแล้ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง สามารถใช้ซ้ำได้เพียง 2 ครั้ง หลังจากนั้นค่าที่ได้จะลดลงกว่าเป้าหมายที่ต้องการกว่าร้อยละ 58

Yavada, Tyagi, Panday, & Sigh (1987) ศึกษาการใช้เถ้าลอยในการกำจัดแคดเมียม โดยการทดลองได้ใช้เถ้าลอยปริมาณ 1 กรัมต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิกรัม และหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือโดยใช้ dithizone method ผลการศึกษา พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 8.5 โดยเวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 84.80 เป็นร้อยละ 89.82 และจากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์สามารถอธิบายประสิทธิภาพการดูดซับได้ว่า ค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดกล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH 4 เป็น pH 8.5 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11.85 เป็นร้อยละ 89.82 และพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อ pH มีค่าเท่ากับ 10

Maronon & Sastre (1992) ศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างกากแอมเปิ้ลที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพและกากแอมเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการกระตุ้นทางเคมีด้วยปฏิกิริยาการควบคุมการทำงานของโปรตีน (phosphorylation reaction) โดยใช้กากแอมเปิ้ลจากขบวนการผลิตน้ำแอมเปิ้ลมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม และปรอท ผลการศึกษา พบว่า กากแอมเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพโดยกระตุ้นกระบวนการทางเคมีด้วย phosphorylation reaction สามารถรับอัตราการไหลที่สูงได้ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดไม่ลดลง ส่วนความสามารถในการกำจัดโลหะหนักเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเรซินสังเคราะห์และกากแอมเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่า กากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินสังเคราะห์

Tiwari, Ghosh, Rupainwar, & Sharma (1993) ศึกษาการนำเถ้าลอยในการกำจัดโลหะแมงกานีสในน้ำเสีย จากการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับค่า pH ความเข้มข้นของโลหะและอุณหภูมิ โดยเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และมีค่า pH เท่ากับ 8 เวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 2 ชั่วโมง สามารถกำจัดได้ร้อยละ 80 แต่หาก pH เท่ากับ 9 สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 99

Hsu (2008) ศึกษาการดูดซับสีย้อมแอสิตด้วยถ้ำลอยถ่านหิน ผลการศึกษา พบว่า ถ้ำลอยถ่านหิน (CFA) ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพใด ๆ มีความสามารถในการดูดซับประจุลบของสีย้อม Acid Red 1 (AR1) ได้มากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 2 ชนิด (CFA-600 และ CFA-NaOH) โดยความสามารถในการดูดซับเรียงลำดับดังต่อไปนี้ CFA > CFA-600 > CFA-NaOH และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (60 > 45 > 30 องศาเซลเซียส) ซึ่งความสามารถในการดูดซับของถ้ำลอยทั้ง 3 ชนิดเป็นไปตาม pseudo-second-order kinetics และสอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ความสามารถในการดูดซับ AR1 ของ CFA, CFA-600 และ CFA-NaOH มีค่าเท่ากับ 92.59-103.09 32.79-52.63 และ 12.66-25.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Pengthamkeerati, Satapanajaru, & Singchan (2008) ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟจากสารละลายด้วยถ้ำลอยชีวมวล จากการศึกษา พบว่า ถ้ำลอยชีวมวลเป็นตัวดูดซับสีย้อมที่ดีที่สุดสามารถดูดซับสีย้อม Reactive Black (RB) และสีย้อม Reactive Yellow (RY) ได้มากที่สุดที่ pH เท่ากับ 8.1-8.5 ที่เวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเกลือ (NaCl) มีผลต่อการดูดซับในเชิงบวกของถ้ำลอยชีวมวล อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สามารถช่วยเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างสีย้อมและถ้ำลอยชีวมวลมีผลให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้น จากข้อมูลคุณภาพของสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรุนดิช ความสามารถการดูดซับแบบขั้นเดียวของถ้ำลอยชีวมวลในการดูดซับสีย้อม RB มีค่าเท่ากับ 4.38 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าสีย้อม RY ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.65 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยกระบวนการดูดซับมีความสอดคล้องกับจลศาสตร์ second-order model โดยรวมแล้วถ้ำลอยชีวมวลที่ศึกษามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียได้

Abdel, Reiad, & Elshafei (2011) ศึกษาลักษณะการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยตัวดูดซับราคาถูก โดยศึกษาพฤติกรรมของตัวดูดซับชีวภาพราคาถูก เช่น เปลือกถั่ว แกลบ ถ่าน ถ้ำลอยและซีโอไลท์ธรรมชาติ เพื่อดูดซับไอออน Cu^{2+} และ Zn^{2+} ศึกษาด้วยวิธีทดลองแบบกะ (batch method) ที่อุณหภูมิ 27 ± 2 องศาเซลเซียส โดยพารามิเตอร์ในการศึกษา เช่น pH ความสัมพันธ์ของเวลา ความเข้มข้นเริ่มต้นของ โลหะหนัก ซึ่งอิทธิพลของค่า pH ของสารละลายโลหะหนักขึ้นอยู่กับระดับของไอออนในโลหะหนัก โดยค่า pH สูงสุดในการกำจัด Cu^{2+} และ Zn^{2+} ด้วยเปลือกถั่ว แกลบ ถ่านและซีโอไลท์ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 6 และถ้ำลอยมีค่า pH สูงสุดในการกำจัดเท่ากับ 8 เวลาที่ตัวดูดซับดูดซับสารละลายได้ดีที่สุดในช่วง 30 นาทีแรก และใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 2 ชั่วโมงในการดูดซับ Cu^{2+} และ Zn^{2+} ด้วย เปลือกถั่ว แกลบ ถ่าน และถ้ำลอย สำหรับซีโอไลท์ธรรมชาติใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 3 ชั่วโมง ซึ่งการหาความสามารถในการดูดซับหาได้จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดิช ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เปลือกถั่ว แกลบ ถ่าน ถ้ำลอยและซีโอไลท์

ธรรมชาติ มีศักยภาพในการกำจัดประจุบวกของโลหะหนักจำเพาะจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ตามลำดับ ดังนี้ แถ์ลอย < เปลือกถั่ว < แกลบ < ถ่าน < ซีโอไลต์ธรรมชาติ

Hegazi (2013) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมเป็นตัวดูดซับ จากการศึกษาได้นำวัสดุดูดซับจากการเกษตรและอุตสาหกรรม ได้แก่ แกลบข้าวและถั่วลันเตา มาดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียของบริษัท EL-AHLIA ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมชุบโลหะ ผลการศึกษา พบว่า วัสดุดูดซับทั้งสองชนิดสามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นระหว่าง 20-60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแกลบข้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ Fe Pb และ Ni สำหรับถั่วลันเตามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก Cd และ Cu โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 2 ชั่วโมง และค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ในช่วง pH 6-7

Akpomie & Dawodu (2015) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมรถยนต์ ด้วยแรมมอนต์มอริลโลไนต์ จากการศึกษา นำแรมมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักจากอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยศึกษาลักษณะของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธี Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทดลองการดูดซับด้วยวิธีทดลองแบบทีละครั้ง (batch method) พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ค่า pH 6.5 ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ขนาดอนุภาคเท่ากับ 100 ไมครอน และเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 180 นาที และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ด้วยโมเดลของ Langmuir, Freundlich Temkin และ Dubinin-Radushkevich พบว่า พื้นผิวที่แตกต่างกัน อธิบายโดยสมการของ Freundlich และความสามารถในการดูดซับสูงสุด Langmuir model มีค่าการดูดซับโลหะหนักดังนี้ Zn (5.7 มิลลิกรัมต่อกรัม) > Cu (1.58 มิลลิกรัมต่อกรัม) > Mn (0.59 มิลลิกรัมต่อกรัม) > Cd (0.33 มิลลิกรัมต่อกรัม) > Pb (0.10 มิลลิกรัมต่อกรัม) = Ni (0.10 มิลลิกรัมต่อกรัม)

Visa, Andronic, & Duta (2015) ศึกษาการนำวัสดุนาโนถั่วลันเตา-TiO₂ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารมลพิษหลายชนิด จากการศึกษาได้สังเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติการดูดซับของวัสดุผสมระดับนาโน โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล ซึ่งมาใช้กับสารควบคุมพื้นผิว ได้แก่ สารละลายถั่วลันเตา-TiO₂ และ hexadecyl trimethyl-ammonium bromide วัสดุดูดซับชนิดใหม่นี้ มีการตรวจสอบลักษณะของผลึก (XRD) ลักษณะพื้นผิว (AFM SEM ความพรุนและ BET surface) และพื้นผิวทางเคมี (EDX และ FTIR) คุณสมบัติของวัสดุนาโนผ่านการทดสอบตามลำดับในกระบวนการดูดซับและ photocatalysis ที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารมลพิษหลายชนิด ประกอบด้วย Cu²⁺ และสีย้อมในอุตสาหกรรม (Bemacid Blau และ Bemacid Rot) วัสดุนาโนตั้งต้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ทั้งในการทดลองการดูดซับและการทดลองการย่อยสลายได้โดยแสง (photodegradation)

Chen, Wang, Xin, Sun, & Wu (2018) ศึกษาพฤติกรรมและกลไกการดูดซับ Cr(VI) ด้วยถ่านชีวภาพ (Biochar) จาก Enteromorpha prolifera จากการศึกษาถ่านชีวภาพที่ได้จาก

Enteromorpha prolifera และการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก (BCF600) โดยมีการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพเคมี พฤติกรรมการดูดซับและกลไกการดูดซับ ผลการศึกษา พบว่าการเปลี่ยนแปลงของถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนบนพื้นผิวน้อยและเต็มไปด้วยอนุภาค $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ โดย BCF600 มีความสามารถในการดูดซับ Cr(VI) สูงสุด ซึ่งค่าดังกล่าวมาจากสมการของ Langmuir ที่ 88.17 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีประสิทธิภาพการดูดซับ Cr(VI) เท่ากับร้อยละ 97.71 ของ 100 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยการดูดซับ Cr(VI) ของ BCF600 ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของไอออนเพิ่มขึ้น จากผล FTIR การเปลี่ยนแปลงของกลุ่ม -OH บนพื้นผิวหลังการดูดซับ พบว่าเกิดไฟฟ้าสถิตจึงเป็นกลไกที่สำคัญ นอกจากนี้ BCF600 สามารถแยกได้ง่ายโดยใช้แม่เหล็กและการรีไซเคิล ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าถ่านชีวมวลจาก *Enteromorpha prolifera* มีประสิทธิภาพในการเป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย

Lu, Lin, Chai, He, & Yang (2018) ศึกษาการกำจัดอะซีแนปทีนด้วยถ่านชีวภาพและวัสดุดูดซับชีวมวลพร้อมกับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักและฟิแนนทริน จากการศึกษาโดยใช้วัสดุดูดซับ 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านชีวภาพ Rice bran (RBB) และ Bamboo (BP) วัสดุดูดซับชีวมวล Rice bran powder (RBP) และ Bamboo powder (BP) ในสารละลายสังเคราะห์ โดยการทดลองใช้ปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากัน คือ 0.3 กรัมต่อลิตร ที่ เวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิด RBB และ BB มีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าวัสดุดูดซับชีวมวล RBP และ BP โดยปัจจัยเรื่องอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเค็มของสารละลาย มีนัยสำคัญต่อการกำจัดอะซีแนปทีนด้วยถ่านชีวภาพ แต่มีนัยสำคัญต่อวัสดุดูดซับชีวมวลน้อย ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพ อยู่ในช่วง 15-45 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดอะซีแนปทีน ได้ร้อยละ 98-43 และร้อยละ 64-47 ของ RBB และ BB ตามลำดับ ค่าความเค็มที่เหมาะสมเท่ากับค่าความเข้มข้นของ NaCl มากกว่า 1 โมลต่อลิตร ซึ่งมีค่า pH 3-9 จากสมการของ Freundlich ($R^2 > 0.995$) อธิบายการดูดซับอะซีแนปทีนของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด พบว่า ความสามารถในการดูดซับ RBB > BB > RBP > BP ซึ่งสารประกอบ Cu^{2+} และ Cr^{6+} ยับยั้งการดูดซับอะซีแนปทีนพร้อมทั้งเกิดการแข่งขันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ แต่ไม่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับชีวมวล โดยกลไกต่าง ๆ ของการดูดซับอะซีแนปทีนด้วยถ่านชีวภาพ และวัสดุดูดซับชีวมวล มีความแตกต่างและไวต่อสารเคมีที่อยู่ร่วมกัน จึงต้องอาศัยกระบวนการแยกบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้งสอง ซึ่งเป็นกลไกในการดูดซับอะซีแนปทีนออกจากสารประกอบที่รวมกันอยู่

Patra, Barnwal, Behera, & Meikap (2018) ศึกษาการกำจัดสีย้อมในสารละลายโดยการดูดซับด้วยถ่านลอยโดยใช้ไฮโดรไซโคลน จากการศึกษาการกำจัดสีย้อม methyl orange พบว่าไฮโดรไซโคลนที่ทำด้วยยางช่วยให้ถ่านลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม methyl orange ซึ่งประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลน และขนาดตัด (cut size d_{50}) สามารถคำนวณได้จากกราฟเส้นโค้ง โดย cut size d_{50} มีขนาด 21 ไมครอน ของถ่านลอย 0.5 กรัมต่อลิตร และได้มี

การนำเถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดสีย้อม methyl orange ด้วย hydrocyclone อย่างต่อเนื่องจากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของเถ้าลอย พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.18 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและปริมาณตัวดูดซับ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุดเท่ากับร้อยละ 60 เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัมต่อลิตร

Fu, Lin, & Chen (2019) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียชุมชนด้วยวัสดุนาโนผสมลิทินิน เช่น titanate/TiO₂ ซิวโมเลกุลของลิทินินถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน titanate/TiO₂ จากการศึกษา ได้เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสูงสุดของอออนโลหะหนัก (Pb²⁺ Cu²⁺ Cd²⁺) ด้วยวัสดุนาโนไททานาตที่ประกอบด้วยลิทินิน 4 ชนิด พบว่าการดูดซับของ Titanate nanotube (WL-TNTs) จาก Willow lignin นั้นเหมาะสมที่สุด วัสดุดูดซับ WL-TNTs สามารถดูดซับ Pb²⁺ Cu²⁺ และ Cd²⁺ ได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Pb²⁺ มีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่ช่วง pH กว้าง (pH 2-7) สภาวะที่เหมาะสมคือ มีค่า pH 6 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถการดูดซับโลหะหนัก Pb²⁺ Cu²⁺ และ Cd²⁺ เท่ากับ 677.6 มิลลิกรัมต่อกรัม 258.2 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 308.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ มีอัตราการดูดซับเร็วและอออนตะกั่วเกือบดูดซับได้ทั้งหมดที่เวลา 5 นาที ซึ่งปริมาณของวัสดุดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 0.2 กรัมต่อลิตร วัสดุดูดซับเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับและฟื้นฟูสภาพได้ดี และเป็นวัสดุดูดซับที่ประหยัด สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง

Assila, Tanji, Zouhrir, Arrahli, Nahali, Zerrouq, & Kherbeche (2020) ศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอด้วยวัสดุแร่ธรรมชาติ 2 ชนิด (M1 และ M2) จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ พบว่า วัสดุดูดซับจากแร่ธรรมชาติ M1 มี SiO₂ และ Fe₂O₃ เป็นส่วนประกอบหลักร้อยละ 53.36 และ 5.61 สำหรับ M2 มีปริมาณ CaO สูง ร้อยละ 18.8 สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับ COD ของ วัสดุดูดซับ M1 ที่ pH 10 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 90 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 79 สอดคล้องกับไอโซเทอมแลงเมียร์ ที่ R² 0.994 สำหรับวัสดุดูดซับ M2 มีประสิทธิภาพดูดซับ COD สูงสุดที่ pH 10 เช่นกัน แต่ใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 160 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 88 การดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแลงเมียร์ R² 0.992 อย่างไรก็ตามได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่า วัสดุดูดซับจากแร่ธรรมชาติ ทั้ง 2 ชนิด ไม่เหมาะสมกับการใช้งานหลายครั้ง

Bisht, Sinha, Nigam, Bisaria, Mehrotra, & Singh (2021) ศึกษาการกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากน้ำทิ้งโรงงานกระดาษด้วยเถ้าลอยนาโน ผลศึกษา พบว่า เถ้าลอยนาโนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและสารต่าง ๆ ในน้ำทิ้งได้ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดร้อยละ 92.45 ที่ปริมาณ

แก๊สลอย 60 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที อัตราการกวนผสม 80 รอบต่อนาทีรอบ สำหรับของแข็งทั้งหมดที่แขวนลอย (TSS) ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS) ฟอสเฟต (phosphates) ซัลเฟต (sulphates) และคลอไรด์ (chlorides) ถูกกำจัดทั้งหมด ทำให้น้ำมีค่า DO สูงขึ้น อีกทั้งค่า BOD และ COD ของน้ำทิ้งมีค่าลดลง

Petel (2021) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาลด้วยแก๊สลอยชานอ้อย ผลศึกษาการดูดซับ COD และสียอมจากการดูดซับแบบคอลัมน์ พบว่า สามารถดูดซับ COD และสี ได้สูงถึงร้อยละ 100 และ 76.6 ตามลำดับ ที่ปริมาณแก๊สลอยชานอ้อย 18 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 140 นาที โดยประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อัตราการไหลที่ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอีกด้วย เมื่อศึกษาความสัมพันธ์กับไอโซเทอม พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมแลงเมียร์ มีค่า R^2 0.9875 และ 0.9856 สำหรับ COD และสี ตามลำดับ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD สียอม และโลหะหนัก ด้วยวัสดุดูดซับชีวมวล มีค่า pH ในช่วงกรดปานกลางจนถึงเบสปานกลาง อุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 25-35 องศาเซลเซียส และไอโซเทอมการดูดซับส่วนใหญ่สอดคล้องกับไอโซเทอมแลงเมียร์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวัสดุดูดซับชีวมวลสามารถนำมาใช้ในการดูดซับ COD สียอม และโลหะหนักได้ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 60



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียกระบวนการผ้าบาติกด้วยถ่านลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของถ่านลอยในการดูดซับ COD สีย้อม และโลหะหนักบางชนิดผ่านการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งการกำหนดสภาวะในการทดสอบ เกิดจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่ 2.3 เห็นได้ว่าถ่านลอยมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ pH เป็นกลางจนถึงเบสแก่ ขนาดของถ่านลอย ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณของถ่านลอย ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านลอย จึงกำหนดค่าสภาวะเพื่อให้ครอบคลุมและสามารถเห็นแนวโน้มการดูดซับได้ชัดเจน โดยดำเนินการใช้วิธีทดลองแบบกะ (batch method) ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และส่งตัวอย่างวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านลอย (พื้นที่ผิวและรูพรุน ลักษณะพื้นที่ผิว และสารประกอบออกไซด์) ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยวิธีการและขั้นตอน ดำเนินการวิจัยสรุปดังนี้

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

3.1.1 ตัวอย่างถ่านลอยที่ใช้ในการทดลอง มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลจากไม้ยางพารา ในจังหวัดยะลา และโรงไฟฟ้าชีวมวลจากแกลบข้าว ในจังหวัดนครปฐม

3.1.2 สารเคมี เครื่องแก้ว และวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

3.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย

3.2.1 อุปกรณ์เก็บน้ำตัวอย่าง ได้แก่ แกลลอนพลาสติกขนาด 3 ลิตร

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่

- (1) ตะแกรงร่อน (sieve) ยี่ห้อ Humboldt
- (2) เตาอบลมร้อน (hot air oven) ยี่ห้อ Linking รุ่น LT900
- (3) เครื่องชั่งละเอียด (analytical balance) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น XS204
- (4) pH meter ยี่ห้อ ADWA รุ่น AD1040

- (5) เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) ยี่ห้อ AS ONE รุ่น REXIM RSH-4DR
- (6) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ขนาด 60 มิลลิเมตร
- (7) ชุดกรองสุญญากาศ (glass vacuum filter) ยี่ห้อ EYELA รุ่น A-10005
- (8) กระดาษกรองใยแก้ว GF/CTM ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- (9) ชุดกลั่นแบบไหลกลับคืน (reflux)
- (10) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasca รุ่น V-530
- (11) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ Atomic Absorption Spectrometry (AAS) ยี่ห้อ Analytikjena รุ่น nova 800
- (12) ตู้ดูดความชื้น (desiccator)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองแบบกะ (batch Method) ในห้องปฏิบัติการ โดยวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา (Rubber Fly Ash; RBFA) และเถ้าลอยแกลบ (Rice Fly Ash; RFA) ในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD สีย้อม และโลหะหนักบางชนิด โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.3.1 ศึกษาลักษณะน้ำตัวอย่างจากกระบวนการผ้าบาติกและสีย้อมสังเคราะห์

วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก (BWW) ประกอบด้วย น้ำเคลือบโซเดียมซัลเฟต (A) น้ำล้างโซเดียมซัลเฟต (B) น้ำต้มผ้า (C) และน้ำล้างผ้า (D) ดังรูปที่ 3 และสีย้อมสังเคราะห์ (SWW) ซึ่งเป็นสีย้อมที่ใช้ในการย้อมผ้าบาติกนำมาละลายในน้ำปราศจากไอออนผ่านพารามิเตอร์ กรด-ด่าง (pH) ของแข็งทั้งหมดที่แขวนลอย (TSS) ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS) ซีไอดี (COD) และโลหะหนัก ดังตารางที่ 7 ตามวิธีมาตรฐานวิเคราะห์คุณภาพน้ำ AWWA, APHA, & WEF (Rive, Baird, & Eaton, 2017) โดยนำข้อมูลผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกมาใช้เพื่อพิจารณาเลือกน้ำสีย้อมสังเคราะห์ที่มีช่วงค่า pH และ COD ใกล้เคียงกับตัวอย่างน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

ตารางที่.7 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	BWW	SWW	Fly ash	วิธีวิเคราะห์
pH	✓	✓	✓	Electrometric
TSS	✓			Dry ¹
TDS	✓			TS-SS
SCOD ²	✓	✓	✓	Open reflux
Heavy Metal	✓	✓	✓	GFAAS ³
พื้นที่ผิวและรูพรุน*			✓	BET ⁴
ลักษณะพื้นที่ผิว*			✓	SEM ⁵
สารประกอบออกไซด์*			✓	XRF ⁶

¹ Total suspended solid dried at 105°C, ² Soluble Chemical Oxygen Demand

³ Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy,

⁴ Brunauer- Emmett-Teller Method,

⁵ Scanning Electron microscope

⁶ X-ray fluorescence spectrometry

* ส่งวิเคราะห์ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

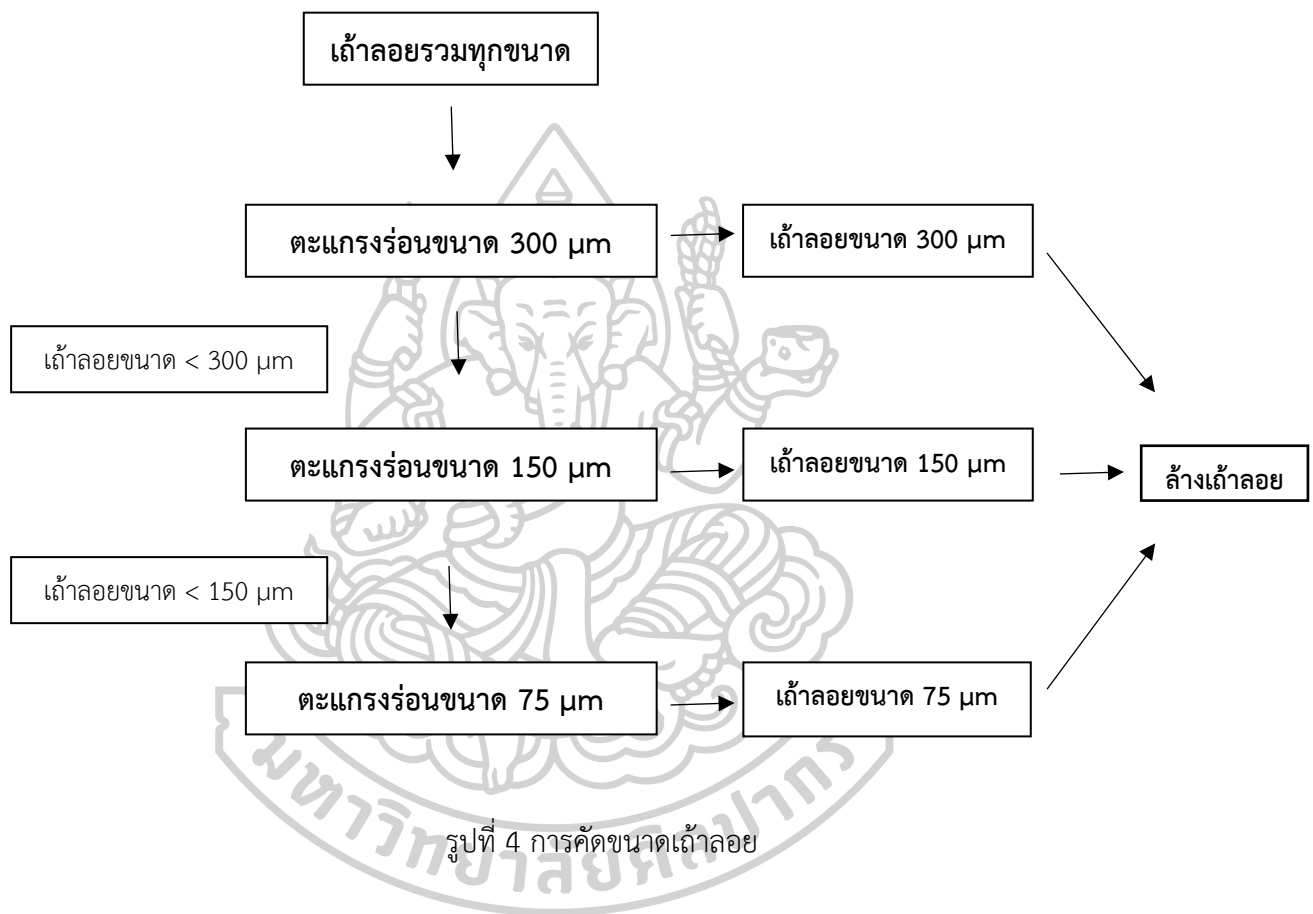
3.3.2 การคัดขนาดและการเตรียมเถ้าลอย

การคัดขนาดของเถ้าลอย ใช้วิธีร่อนแห้ง (dry sieving) โดยนำตัวอย่างเถ้าลอยร้อนผ่านตะแกรงร้อนมาตรฐานตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (75, 150 และ 300 ไมครอน) เพื่อแยกเถ้าลอยตามขนาดที่ต้องการ ดังรูปที่ 4 จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาด ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) อัตราส่วนเถ้าลอย 100 กรัม ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 1 ลิตร กวนด้วยความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง บนเครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) เมื่อครบเวลาตั้งทิ้งให้เถ้าลอยตกตะกอน นำตะกอนเปียกที่ได้อบด้วยเตาอบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105-115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และใส่ในโถดูดความชื้น (desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บรรจุใส่ภาชนะปิดสนิทก่อนนำไปใช้งานต่อไป (Visa, Andronic, & Duta, 2015)

3.3.3 การศึกษาคุณสมบัติเถ้าลอย

ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยไม่ย่างพารา (RBFA) และเถ้าลอยแกลบ (RFA) จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ด้วยการวิเคราะห์พื้นที่ผิว รูพรุน และสารประกอบออกไซด์ ด้วยวิธี BET SEM และ XRF โดยส่งวิเคราะห์ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ศึกษาการตกค้าง COD และโลหะหนักปนเปื้อนก่อนการใช้ดูดซับ (ตารางที่ 7) โดยนำเถ้าลอย

กวนผสมกับน้ำปราศจากไอออน 10 กรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องกวนสารความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C™ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร น้ำที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์ COD ในรูปละลายน้ำ ด้วยวิธี open reflux และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ Pb Fe Mn และ Zn ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometry (AAS)



3.3.4 การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และ สีย้อมด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

ทดสอบปัจจัยประกอบด้วย ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ขนาดถ้ำลอย ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณถ้ำลอยที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีย้อม มีรายละเอียดดังนี้ (รูปที่ 5 และตารางที่ 8)

3.3.4.1 ทดสอบผลช่วงค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ

กำหนดอัตราส่วนของถ้ำลอยต่อน้ำตัวอย่าง 10 กรัมต่อลิตร (Kitchainukul, 2013) แล้วทำการปรับค่า pH ของน้ำตัวอย่างด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้มีค่า pH เท่ากับ 5 6 7 และ 8 ± 0.5 จากนั้นนำไปกวนผสมที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เนื่องจากการดูดซับสารอินทรีย์ สีย้อม และโลหะหนัก อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการดูดซับ เพราะสามารถดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิของอากาศ ประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส โดยกวนผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้ถ้ำลอยตกตะกอน 10 นาที แล้วนำไปกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C™ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร น้ำที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์ COD ด้วยวิธี open reflux และวิเคราะห์ค่าการดูดซับสีย้อมด้วยเครื่อง spectrophotometer

3.3.4.2 ทดสอบขนาดของถ้ำลอยที่มีผลต่อการดูดซับ

กำหนดอัตราส่วนของถ้ำลอยต่อน้ำตัวอย่าง 10 กรัมต่อลิตร โดยทดสอบถ้ำลอย 3 ขนาด ได้แก่ 75 150 และ 300 ไมครอน จากนั้นทำการปรับค่า pH ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.3.4.1 นำไปกวนผสมที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้ถ้ำลอยตกตะกอน 10 นาที แล้วนำไปกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C™ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร น้ำที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์ COD ด้วยวิธี open reflux และวิเคราะห์ค่าการดูดซับสีย้อมด้วยเครื่อง spectrophotometer

3.3.4.3 ทดสอบระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับ

กำหนดอัตราส่วนของถ้ำลอยต่อน้ำตัวอย่าง 10 กรัมต่อลิตร แล้วทำการปรับค่า pH และใช้ขนาดของถ้ำลอยที่เหมาะสมจากการทดสอบขั้นตอนที่ 3.3.4.1-3.3.4.2 จากนั้นนำไปกวนผสมที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 4 8 16 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ตั้งทิ้งไว้ให้ถ้ำลอยตกตะกอน 10 นาที แล้วนำไปกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C™ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร น้ำที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์ COD ด้วยวิธี open reflux และวิเคราะห์ค่าการดูดซับสีย้อมด้วยเครื่อง spectrophotometer

3.3.4.4 ทดสอบปริมาณแกลลวยที่มีผลต่อการดูดซับ

นำผลขนาดของแกลลวยที่เหมาะสมจาก ขั้นตอนที่ 3.3.4.2 ในปริมาณที่เท่ากับ 5 15 25 50 100 และ 150 กรัม ต่อน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร ตามลำดับ ทำการปรับ pH และใช้ค่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.3.4.1 และ 3.3.4.3 จากนั้นนำไปกวนผสมที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้แกลลวยตกตะกอน 10 นาที แล้วนำไปกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C™ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร น้ำที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์ COD ด้วยวิธี open reflux และวิเคราะห์ค่าการดูดซับสีด้วยเครื่อง spectrophotometer

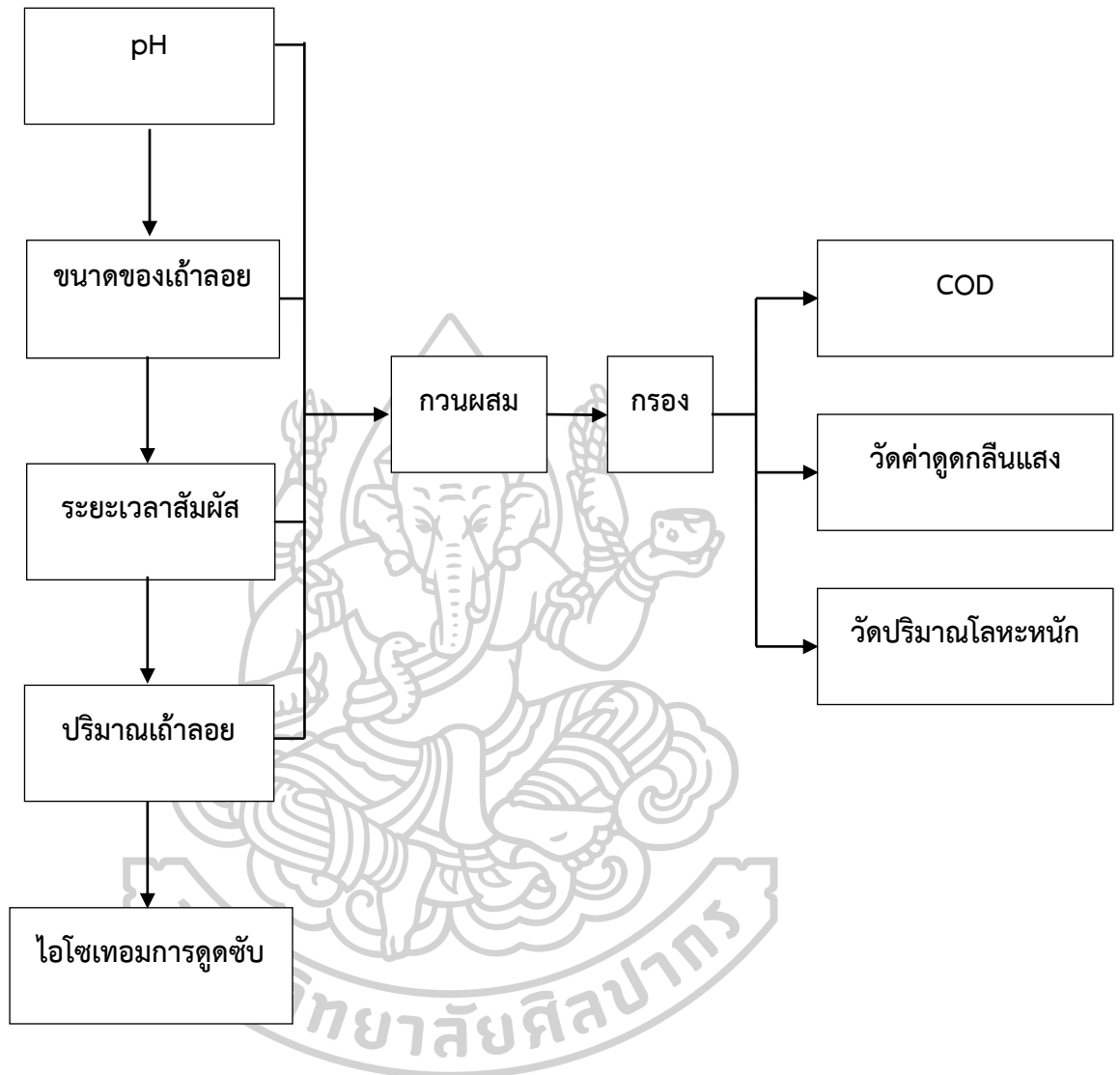
3.3.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาร่วมกับไอโซเทอมการดูดซับ

ดำเนินการโดยนำข้อมูลผลการศึกษามาวิเคราะห์เพื่อหาความสอดคล้องกับไอโซเทอม 2 แบบ ได้แก่ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมของฟรุนดิช (Freundlich isotherm) โดยใช้ผลจากขั้นตอนที่ 3.3.4.4 ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ตามทฤษฎีไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดิช

3.3.6 ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ COD และสีของแกลลวยแกลบ

ดำเนินการทดสอบเช่นเดียวกับขั้นตอน 3.3.4.1 3.3.4.3 และ 3.3.4.4 ด้วยแกลลวยแกลบและวิเคราะห์ผลการศึกษาร่วมกับไอโซเทอมการดูดซับ เพื่อพิจารณาเลือกใช้แกลลวยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารอินทรีย์ (COD) และสี (หัวข้อ 3.3.7)





รูปที่ 5 ชุดทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีขุ่น

ตารางที่ 8 ทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากโรงไฟฟ้าชีวมวล

ตัวอย่าง	สถานะที่กำหนดในการทดสอบ			
	pH	ขนาดของถ่านกัมมันต์ (ไมครอน)	เวลาที่ใช้ในการสัมผัส (นาที)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อลิตร (รอบต่อนาที)
น้ำเสียส้มเสี้ยว (SWW)				ความเร็วรอบกวน (รอบต่อนาที)
สีน้ำเงิน (B-SWW)	5, 6, 7 และ 8±0.5	75, 150 300 และขนาดรวม 2, 4, 8, 16 และ 24	5, 15, 25, 50, 100 และ 150	180-200
น้ำเสียผ้าบาติก (BWW)				
น้ำล้างโซเดียมซัลไฟด์ (SW-BWW)				

3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (pilot model)

ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบชุดทดลองมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 6 และใช้ข้อมูลสถานะที่เหมาะสมจากชุดการทดลองแบบกะของตัวอย่างน้ำเสียย้อมสังเคราะห์ มาใช้ทดสอบด้วยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก (น้ำล้างโซเดียมซัลไฟด์) โดยใช้ระบบชุดทดลองขนาดใหญ่นี้ด้วยวิธีแบบกะ (batch method) ซึ่งน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกในแต่ละเดือนมีปริมาตรประมาณ 500 ลิตร โดยแต่ละชุดการทดลองใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก 10 ลิตร (ร้อยละ 2 ของปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น) ประกอบไปด้วย (1) ถังพักน้ำเสียเข้า เป็นพลาสติกขนาดความจุประมาณ 20 ลิตร ภายในถังพักน้ำเสียเข้าระบบมีปั้มน้ำตู้ปลาี่ห้อ lifetech รุ่น AP1600 ทำหน้าที่สูบเพื่อหมุนเวียนน้ำภายในถังให้เป็นเนื้อเดียวกัน (2) ถังปฏิกรณ์ (reactor tank; RT) เป็นพลาสติกขนาดความจุประมาณ 20 ลิตร พร้อมใบพัด ทำหน้าที่กวนผสมไม่ให้เกิดการตกตะกอนสู่ก้นถังขณะเดินระบบ เมื่อครบเวลาที่ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง ก่อนปล่อยน้ำส่วนใสเข้าสู่ชุดกรองทรายแบบกรองช้า (3) ปั้มน้ำ (feed pump) ยี่ห้อ Masterflex L/S Digital economy drive 10-600 รอบต่อนาที ทำหน้าที่ปั้มน้ำเสียเข้าระบบชุดกรองทรายแบบกรองช้า กำหนดอัตราการปั้มน้ำเท่ากับ 3.5 นาทีต่อลิตร (4) ชุดกรองทรายแบบกรองช้า (slow sand filtration; SSF) เป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1 เมตร บรรจุทรายกรองขนาด 0.1-0.8 มิลลิเมตร (ดีเรก และคณะ, 2545) ความสูงของชั้นกรวดสูง 0.15 เมตร ความสูงของชั้นทรายกรองสูง 0.60 เมตร และความสูงของชั้นรับน้ำสูง 0.25 เมตร โดยควบคุมค่าอัตราการกรอง 0.13–0.42 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง (สมฤดีศรีประเสริฐ, มปป.) เมื่อเสร็จสิ้นแต่ละชุดการทดลอง กวาดตะกอนที่ผิวหน้าของชั้นทรายด้านบนออก (5) ถังเก็บน้ำหลังบำบัด เป็นพลาสติกขนาดความจุประมาณ 20 ลิตร ทำหน้าที่รับน้ำจากชุดกรองทรายแบบกรองช้า ขณะเดินระบบวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสีย ดังแสดงวิธีวิเคราะห์และรายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์และความถี่สำหรับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างขณะเดินระบบ

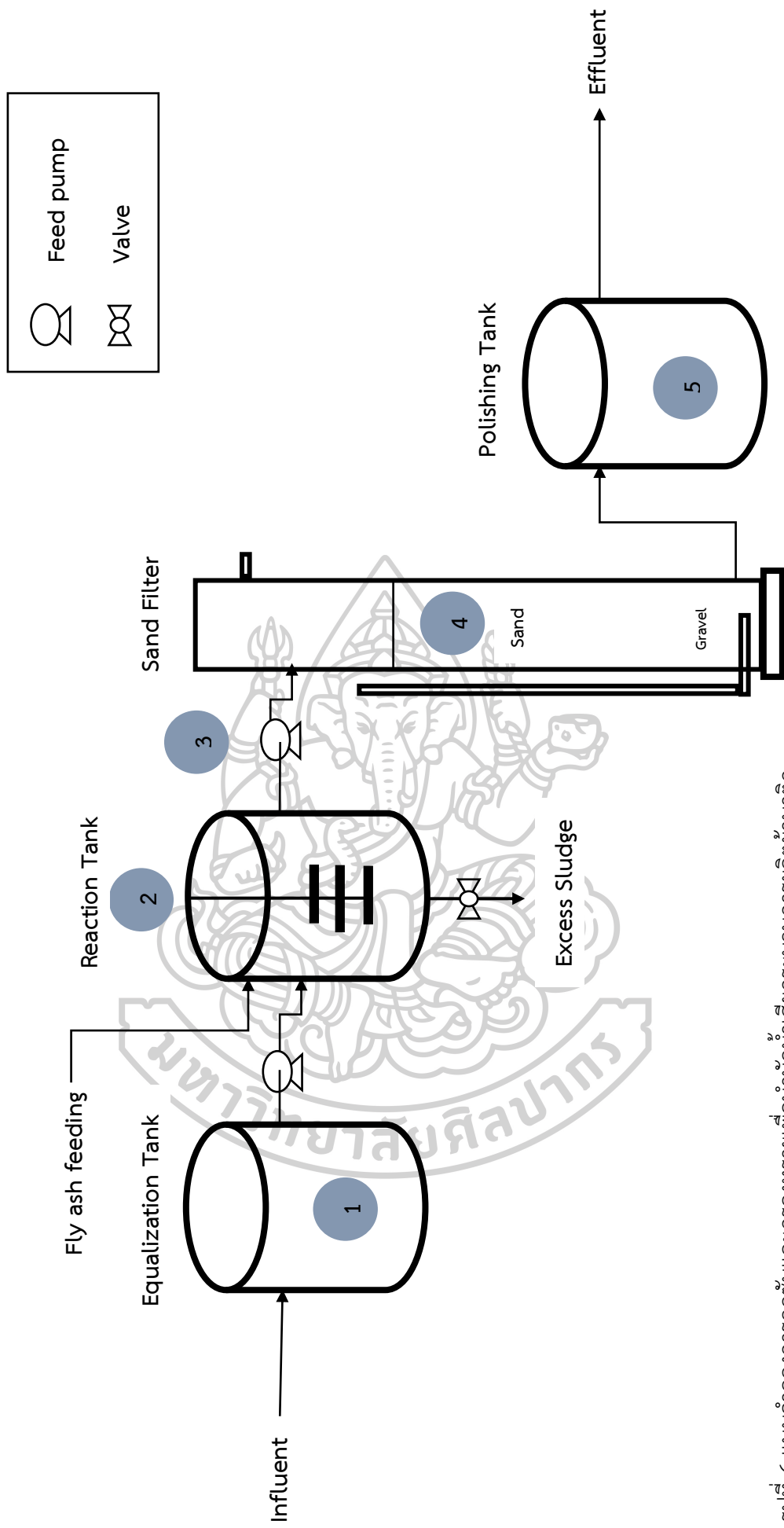
พารามิเตอร์	จุดเก็บน้ำตัวอย่าง						ความถี่ (ครั้ง/ สัปดาห์)	วิธีการวิเคราะห์
	น้ำเข้า		ถังปฏิกรณ์		น้ำออก			
	SWW	BWW	SWW	BWW	SWW	BWW		
pH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ทุกวัน	Electrometric
TSS	✓	✓					ทุกวัน	Dry ¹
TDS	✓	✓					ทุกวัน	TS-SS
Turbidity	✓	✓			✓	✓	ทุกวัน	Turbidimeter
COD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ทุกวัน	Open reflux

หมายเหตุ :SWW คือ น้ำเสียก่อนสังเคราะห์ BWW คือ น้ำเสียจากระบวนการผลิตผ้าบาติก

¹ Total suspended solid dried at 105°C

3.3.8 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลด้วยชุดทดลองขนาดใหญ่ (Pilot model)





รูปที่ 6 แบบจำลองการดูดซับและการกรองทรายเพื่อบำบัดน้ำเสียกระบวนการผลิตไฟฟ้าถ่านหิน

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกและสีย้อมสังเคราะห์

ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก (BWW) ของอุตสาหกรรมครัวเรือนผ้าบาติก จังหวัดยะลา โดยกระบวนการผลิตผ้าบาติกก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์และสีย้อมในปริมาณสูง จากขั้นตอนการเคลือบโซเดียมซัลไฟด์ (S-BWW) การล้างโซเดียมซัลไฟด์ (SW-BWW) การต้มผ้า (B-BWW) และขั้นตอนการล้างผ้า (BW-BWW) ซึ่งลักษณะน้ำเสียแต่ละครั้งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและความต้องการของตลาด จากการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์พารามิเตอร์ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2560) พบว่า น้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกมีค่า pH COD TSS และ TDS สูงเกินค่ามาตรฐาน ขณะที่ค่า TSS ของน้ำตัวอย่าง BW-BWW ค่า TDS ของน้ำตัวอย่าง S-BWW และ BW-BWW มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (ตารางที่ 10) เนื่องจากในกระบวนการผลิตผ้าบาติกมีการใช้โซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ส่งผลให้น้ำเสียมีค่า pH ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ขั้นตอนการต้มผ้า (B-BWW) และล้างผ้า (BW-BWW) นั้นมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสีย้อมจากการละลายของเทียนและสีย้อมตลอดจนการใช้ผงซักฟอกหรือน้ำส้มสายชูในการลอกเทียน โดยวิจัยของพิเชษฐ์ หนูหมื่น (2557) ศึกษาลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก 2 ประเภท คือ น้ำจากกระบวนการลอกเทียน (น้ำต้มเทียน) และน้ำจากกระบวนการล้างทำความสะอาดผ้า (น้ำล้างผ้า) พบว่า น้ำต้มเทียนมีค่า COD BOD5 TDS ความขุ่น และสี มีค่าเกินมาตรฐานและมีค่าสูงกว่าน้ำล้างผ้าถึงแม้มีปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้อยกว่า

จากผลศึกษาลักษณะน้ำสีย้อมสังเคราะห์ประกอบด้วย น้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน (B-SWW) และสีแดง (R-SWW) พบว่า มีค่า COD เท่ากับ 579 ± 12.78 และ 144 ± 16.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด 120 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณโลหะหนัก พบว่า น้ำตัวอย่าง S-BWW SW-BWW และ B-BWW มีปริมาณตะกั่ว (Pb) เกินค่ามาตรฐานน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามจากการทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน B-SWW (3.3.3) พบว่า ถ้ำลอยไมยางพารา (RBFA) และถ้ำลอยแกลบ (RFA) ไม่สามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดได้ (ภาคผนวก ก) เนื่องจากอิทธิพลของค่า pH ส่งผลให้ประจุที่ผิวของถ้ำลอยเปลี่ยน กล่าวคือ เมื่อ pH ของสารละลายลดลงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวกจะลดลง ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับโลหะประจุลบจะเพิ่มขึ้น

(Kumar et al., 2011) ซึ่งโลหะหนักที่ทำการทดสอบทั้ง 4 ชนิดมีประจุบวก จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับได้น้อยหรือไม่เกิดการดูดซับเลย อีกทั้งสารละลายสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงินก็พบปริมาณโลหะหนักในปริมาณที่น้อยมาก จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ไม่เกิดการดูดซับ

4.2 คุณสมบัติของเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล 2 ชนิด คือ เถ้าลอยไม้ยางพารา (RBFA) จากโรงไฟฟ้าชีวมวลในจังหวัดยะลา และเถ้าลอยแกลบ (RFA) จากโรงไฟฟ้าชีวมวลในจังหวัดนครปฐม เมื่อนำเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด ทำการคัดขนาดและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยผลการศึกษาคคุณสมบัติของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอย RBFA รวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด) มีลักษณะเป็นผงสีเทา มีหลายขนาดปะปน (รูปที่ 7 A) โดยมีสัดส่วนของขนาด 300 150 และ 75 ไมครอน อยู่ร้อยละ 16.11 3.89 และ 3.01 ตามลำดับ โดยมีขนาดใหญ่กว่า 300 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 76.99 มีพื้นผิวเป็นรูพรุนและโพรงกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 8.02 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวเฉลี่ย 65.03 ตารางเมตรต่อกรัม (รูปที่ 7 C และ 7 D) ซึ่งมีปริมาณพื้นที่ผิวเฉลี่ยมากกว่างานวิจัยของอาปีเต็ง ฮาวา (2551) ซึ่งมีค่าเพียง 9.23 ตารางเมตรต่อกรัม อาปีเต็ง ฮาวา ได้กล่าวอีกว่าอนุภาคของเถ้าลอยไม้ยางพารามีลักษณะคล้ายเม็ดทรายกรวดเรียงตัวกัน ซึ่งทำให้เถ้าลอยไม้ยางพารามีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก สำหรับเถ้าลอยแกลบ (RFA) มีผนังผิวก่อนข้างขรุขระ ลักษณะคล้ายเม็ดทรายเรียงตัวกันเป็นจำนวนมาก มีรูพรองทั่วไป โดยจากการศึกษาลักษณะของเถ้าลอย RFA พบว่า เป็นผงสีเทาปนขาว ไม่ละเอียด คงรูป (รูปที่ 7 B) มีสัดส่วนของขนาด 300 150 และ 75 ไมครอน อยู่ร้อยละ 26.48 24.52 และ 7.22 ตามลำดับ และขนาดใหญ่กว่า 300 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 41.78 มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย 28.89 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.84 นาโนเมตร จากงานวิจัยของ Genesan et al., (2008) พบว่า เถ้าลอยแกลบ มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยเท่ากับ 36.47 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของอาปีเต็ง ฮาวา (2551) ที่มีค่าพื้นที่ผิวเฉลี่ย 33.13 ตารางเมตรต่อกรัม ขณะทำงานวิจัยของ Phihusut and Chattharat (2017) มีปริมาณพื้นที่ผิวเฉลี่ย 149.66 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.7 นาโนเมตร ซึ่งพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับกระบวนการเผาหรือกระบวนการสังเคราะห์ เมื่อใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม ส่งผลให้พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนมีปริมาณสูง ได้แก่ การสังเคราะห์เถ้าลอยแกลบที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 นาที มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยเท่ากับ 122 ตารางเมตรต่อกรัม ขณะที่ใช้อุณหภูมิเดียวกัน เพิ่มระยะเวลาเป็น 30 นาที ส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวเฉลี่ยลดลงเหลือ 97 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้เถ้าลอยแกลบมีพื้นที่ผิวเฉลี่ยลดลงเช่นกัน (Chandra, 1997 ; Singh, 2018) นอกจากนี้ส่วนประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ที่พบมากที่สุด ใน เถ้าลอย RBFA คือ CaO SiO_2 MgO และ Al_2O_3 มีสัดส่วนร้อยละ 43.61 9.19 4.47 และ 3.65

ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของวรวิธร บุญยะโรจน์ และศิริชัย สาระมนัส (2561) พบว่า เถ้าลอยไม้ยางพารามีส่วนประกอบทางเคมีที่พบมากที่สุด คือ CaO SiO_2 SO_3 และ K_2O มีสัดส่วนร้อยละ 45.9 17.2 11.9 และ 6.53 ตามลำดับ โดยตุนพล และคณะ (2555) กล่าวว่า เถ้าลอยไม้ยางพาราที่มีปริมาณ CaO เป็นส่วนประกอบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนประกอบทางเคมีอื่น ๆ เถ้าลอย RFA มีส่วนประกอบทางเคมีในรูปของออกไซด์ที่พบมากที่สุด คือ SiO_2 K_2O CaO และ MgO มีสัดส่วนร้อยละ 91.35 2.27 0.65 และ 0.36 ตามลำดับ (ตารางที่ 11) เห็นได้ว่าเถ้าลอยแกลบมีปริมาณ SiO_2 มากกว่าร้อยละ 90 ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sivalingam & Sen (2020) พบว่า เถ้าลอยแกลบมีปริมาณ SiO_2 ร้อยละ 89.69 นอกจากนี้ พบว่า อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอย RBFA และ RFA มีค่า 2.52 และ >50 ตามลำดับ ดังนั้นเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ มากกว่า 2.4 นับว่ามีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี (Visa et al., 2012) แต่อย่างไรก็เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ลักษณะทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิวและรูพรุนของเถ้าลอยเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากกว่าอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ และจากการทดสอบการตกค้างของ COD ด้วยน้ำปราศจากอิออนของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด (ขั้นตอนที่ 3.3.3) พบว่า เถ้าลอย RBFA และ RFA มีค่า COD ละลายออกมา ร้อยละ 12.34 และ 8.12 ตามลำดับ (ตารางที่ 10) ซึ่งค่าดังกล่าวนำไปพิจารณาร่วมกับผลร้อยละการดูดซับ COD ที่เหลือ อันเนื่องมาจากเถ้าลอยที่ตกค้างในน้ำตัวอย่าง (หัวข้อ 4.3.1-4.3.4)



ตารางที่ 10 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)									
	pH	TSS	TDS	COD	Pb	Fe	Mn	Zn		
S-BWW	11.53	58.67±44.24	460.00±69.39	9,420.00±3.62	0.0347	2.5230	0.2128	0.2413		
SW-BWW	8.66	460.00±6.11	9,613.33±63.40	109.57±2.17	0.0389	0.8581	0.0779	0.9696		
B-BWW	10.83	58.67±44.24	18,342.67±258.81	268.32±26.81	0.1806	2.0910	0.1869	1.7560		
BW-BWW	9.11	24.00±4.00	2,621.33±136.14	215.00±17.68	0.0159	1.0360	0.1749	0.6403		
B-SWW	6.52	-	-	579±12.78	0.0018	0.1602	0.0291	0.0164		
R-SWW	5.09	-	-	144±16.63	ND	0.0352	0.0138	ND		
RBFA	10.83	-	-	72.07±10.85	0.0025	ND	ND	0.1162		
RFA	11.57	-	-	47.00±9.40	0.0021	0.0025	0.030	0.1194		
ค่ามาตรฐาน	5.5-9	50	3,000	120	0.02	-	5.0	5.0		

หมายเหตุ : S-BWW คือ น้ำโซเดียมซัลไฟด์

SW-BWW คือ น้ำล้างโซเดียมซัลไฟด์

B-BWW คือ น้ำต้มผ้า

BW-BWW คือ น้ำล้างหลังต้มผ้า

B-SWW คือ น้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน

R-SWW คือ น้ำสีย้อมสังเคราะห์สีแดง

RBFA คือ ถ้ำลอยไม่ย่างพารา

RFA คือ ถ้ำลอยแกลบ

ตารางที่ 11 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

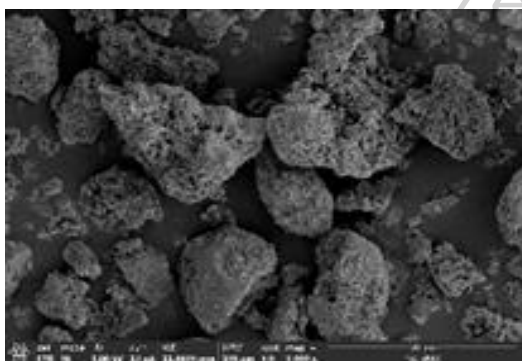
ส่วนประกอบของเถ้าลอย	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	RBFA	RFA
Na ₂ O	0.06	0.038
MgO	4.47	0.037
Al ₂ O ₃	3.65	0.086
SiO ₂	9.19	95.468
P ₂ O ₅	2.83	0.572
SO ₃	0.76	0.059
Cl	0.05	0.023
K ₂ O	1.94	2.375
CaO	43.61	0.675
TiO ₂	0.19	-
MnO	0.72	0.091
Fe ₂ O ₃	1.08	0.082
NiO	0.02	-
CuO	0.02	-
ZnO	0.09	0.003
Rb ₂ O	0.02	0.008
SrO	0.15	0.002
ZrO ₂	0.01	0.003
BaO	0.14	-
PbO	0.01	-
CHNO	14.85	-
CO ₂	16.16	-



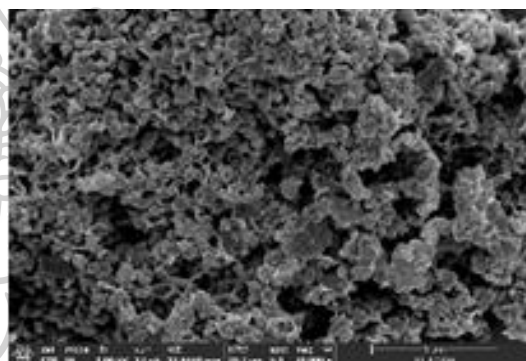
(A) ถ้ำลอย RBFA



(B) ถ้ำลอย RFA



(C) กำล้งขยาย 3,000 เท่าของถ้ำลอย RBFA



(D) กำล้งขยาย 20,000 เท่าของถ้ำลอย RBFA

รูปที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอย

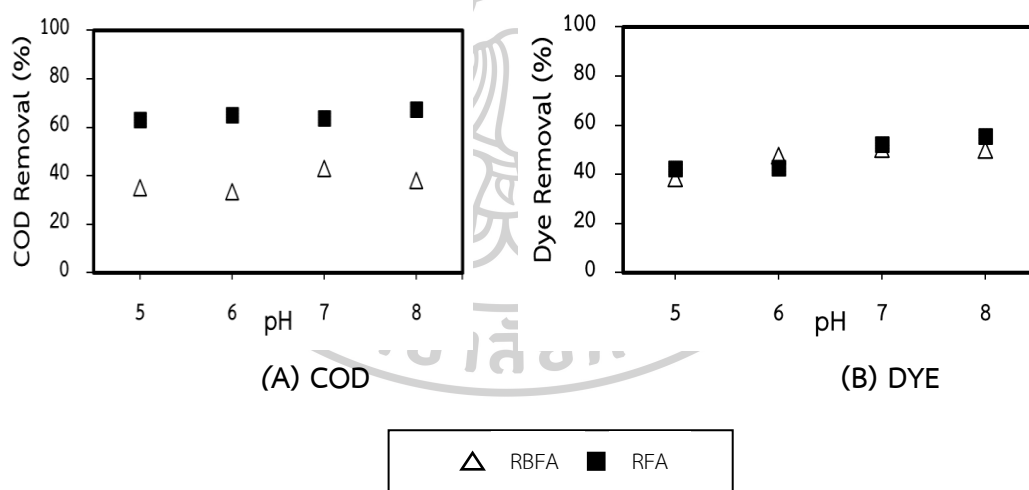
4.3 ผลของสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD และสีย้อมด้วยถ้ำลอย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในลดสารอินทรีย์ในรูป COD และสีย้อมด้วยถ้ำลอย RBFA และ RFA ประกอบด้วย ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ขนาดถ้ำลอย ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณถ้ำลอย มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ผลของ pH

การทดสอบหาค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ COD และสีย้อม เมื่อทดสอบกับตัวอย่างน้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน B-SWW (ตารางที่ 10) โดยใช้ถ้ำลอย RBFA ที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร กวนผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนครบระยะเวลาทิ้งให้ถ้ำลอยตกตะกอน สารละลายส่วนใสที่ได้ พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมร้อยละ 35-50 ที่ pH 5-8 โดยร้อยละการดูดซับ COD ที่ pH 5 6 7 และ 8 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35.04 ± 0.81 33.63 ± 0.81 42.94 ± 0.77 และ 37.99 ± 6.52 ตามลำดับ ค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 38.31 ± 3.08

47.76±0.08 50.38±0.14 และ 49.97±0.30 ตามลำดับ ซึ่ง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับด้วยเถ้าลอย RBFA คือ pH 7 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีขุ่นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ pH 5 6 และ 8 ต่างจากการดูดซับ COD และสีขุ่นด้วยเถ้าลอย RFA พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุดในที่ pH 8 มีร้อยละการดูดซับ COD และสีขุ่นสูงถึงร้อยละ 67 และ 55 ตามลำดับ (รูปที่ 8) เป็นผลจากเถ้าลอย RFA มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกับเถ้าลอย RBFA กล่าวคือ เถ้าลอย RFA มีปริมาณ SiO_2 สูงกว่าเถ้าลอย RBFA (ตารางที่ 11) โดย SiO_2 เป็นส่วนประกอบทางเคมีที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของเถ้าลอย และสาเหตุที่ทำให้เถ้าลอย RBFA และเถ้าลอย RFA มีค่า pH ที่เหมาะสมแตกต่างกัน อาจเกิดจากประจุบนพื้นผิวของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดต่างกัน จากงานวิจัยของ Harja, Ciobanu, Favier, Bulgariu & Rusu (2016) ทดสอบการดูดซับสีคริสตัลไวโอเล็ตด้วยเถ้าลอยถ่านหิน ที่ pH 10 ได้ประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 93 โดยมี SiO_2 เป็นส่วนประกอบหลัก คิดเป็นร้อยละ 51.2 ในขณะที่ Sivalingam & Sen (2020) ใช้เถ้ากลบในการดูดซับสีคริสตัลไวโอเล็ต ที่ pH 8 ได้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 99.99 มี SiO_2 ร้อยละ 87.18 เห็นได้ว่าเมื่อใช้เถ้าลอยต่างชนิดที่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกันดูดซับสีขุ่นชนิดเดียวกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน



รูปที่ 8 ผลของ pH ต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีขุ่นสังเคราะห์

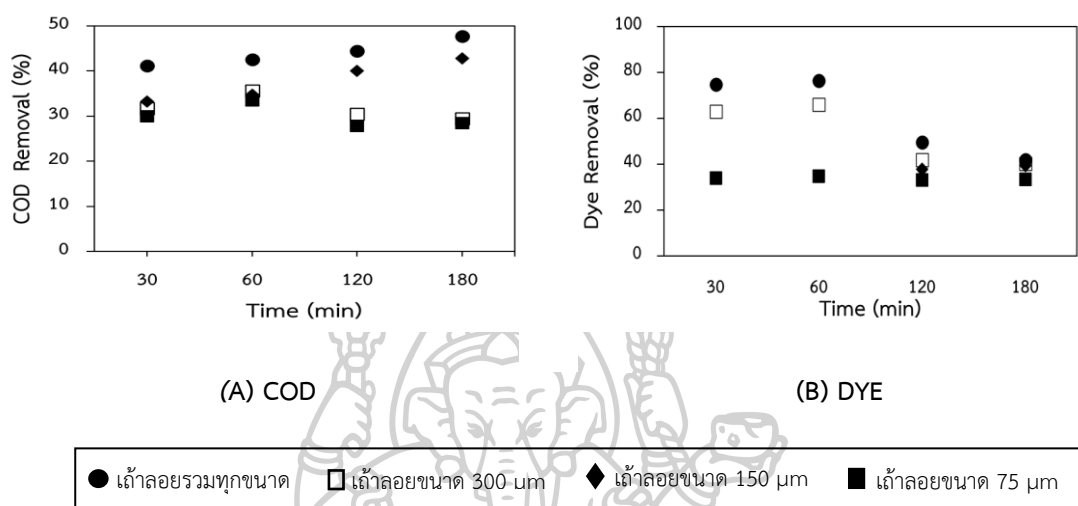
4.3.2 ผลของขนาดเถ้าลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การคัดขนาดเถ้าลอยจากขั้นตอน 3.3.2 แบ่งเป็น 4 ขนาด คือเถ้าลอยรวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด) เถ้าลอยขนาด 300 ไมครอน เถ้าลอย 150 ไมครอน และเถ้าลอยขนาด 75 ไมครอน เมื่อนำเถ้าลอย RBFA ทั้ง 4 ขนาดกวนผสมกับน้ำสีขุ่นสังเคราะห์ B-SWW ปริมาณเถ้าลอยแต่ละขนาดเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร โดยทดสอบที่ pH 7 (ผลทดสอบข้อ 4.3.1) ระยะเวลา

สัมผัส 30 60 120 และ 180 นาที กวณผสมจนครบระยะเวลาทิ้งให้แก๊สลอยตกตะกอน เมื่อนำสารละลายส่วนใสมาวิเคราะห์ พบว่า แก๊สลอยรวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด) และแก๊สลอยขนาด 150 ไมครอน มีแนวโน้มค่าร้อยละการดูดซับ COD เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึง 180 นาที (รูปที่ 9 A) โดยแก๊สลอยรวมทุกขนาดมีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 41.21 ± 1.41 42.62 ± 1.41 44.50 ± 2.16 และ 47.79 ± 3.26 ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ โดยระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับ COD สูงสุด และมีประสิทธิภาพสูงกว่า แก๊สลอยขนาด 150 ไมครอน โดยแก๊สลอยขนาด 150 ไมครอน มีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 33.25 ± 3.71 34.72 ± 0.85 40.04 ± 0.19 และ 42.85 ± 0.07 ตามลำดับ เกิดจากประสิทธิภาพการดูดซับมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวของแก๊สลอย ส่งผลให้แก๊สลอยรวมทุกขนาดมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้มากกว่าแก๊สลอยขนาด 150 ไมครอน เนื่องจากแก๊สลอยรวมทุกขนาดมีปริมาณพื้นที่ผิวมากกว่า (หัวข้อ 4.2) โดยแก๊สลอยขนาด 150 ไมครอน มีค่าพื้นที่ผิวเฉลี่ยเท่ากับ 42.46 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับแก๊สลอยขนาด 300 ไมครอน มีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 31.78 ± 3.40 35.71 ± 0.00 30.4 ± 0.89 และ 29.45 ± 2.34 ตามลำดับ และแก๊สลอยขนาด 75 ไมครอน มีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 29.96 ± 1.53 33.54 ± 1.77 27.91 ± 1.77 และ 28.43 ± 0.00 ตามลำดับ เห็นได้ว่าแก๊สลอยขนาด 300 และ 75 ไมครอน มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงต่ำกว่าร้อยละ 30 เมื่อระยะเวลาสัมผัสสูงกว่า 60 นาที

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม พบว่า แก๊สลอยรวมทุกขนาดมีค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 74.63 ± 1.64 76.32 ± 0.34 49.62 ± 1.15 และ 41.73 ± 1.83 ตามลำดับ แก๊สลอยขนาด 300 ไมครอน มีค่าร้อยละการดูดซับสีย้อม เท่ากับ 63.05 ± 1.21 66.06 ± 2.69 41.95 ± 0.28 และ 40.28 ± 1.46 ตามลำดับ และแก๊สลอยขนาด 150 ไมครอน มีค่าร้อยละการดูดซับสีย้อม เท่ากับ 74.43 ± 0.54 76.48 ± 0.45 37.78 ± 1.94 และ 39.53 ± 0.159 ตามลำดับ (รูปที่ 9 B) ซึ่งทั้ง 3 ขนาดมีแนวโน้มร้อยละการดูดซับสีย้อมลดลงหลังเวลาที่ 60 เช่นกัน เนื่องจากเกิดการคายซับ (desorption) โดยสารละลายอินทรีย์และสีย้อมถูกปล่อยออกมาจากพื้นที่ผิวของแก๊สลอย ซึ่งการคายซับที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) (Mamitiana et al., 2018) ในขณะที่แก๊สลอยขนาด 75 ไมครอน มีค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 33.88 ± 0.06 34.61 ± 0.16 33.07 ± 0.14 และ 33.42 ± 0.19 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มร้อยละการดูดซับค่าสีย้อมคงที่ ดังนั้นขนาดแก๊สลอยที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับค่า COD และสีย้อมในการศึกษานี้ คือแก๊สลอยรวมทุกขนาด ซึ่งมีสัดส่วนของขนาดแก๊สลอยใหญ่กว่า 300 ไมครอน อยู่ร้อยละ 76.99 มีลักษณะเป็นรูและโพรงภายในแก๊สลอย ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวดูดซับด้านใน (internal pore surface) กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว (รูปที่ 7) ส่งผลให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดูดติดบนผิวภายในรูและโพรงบางส่วนหรือเรียงตัวจนเต็ม (internal pore adsorption) งานวิจัยของ Dizge, Aydiner, Demirbas, Kobya, & Kara

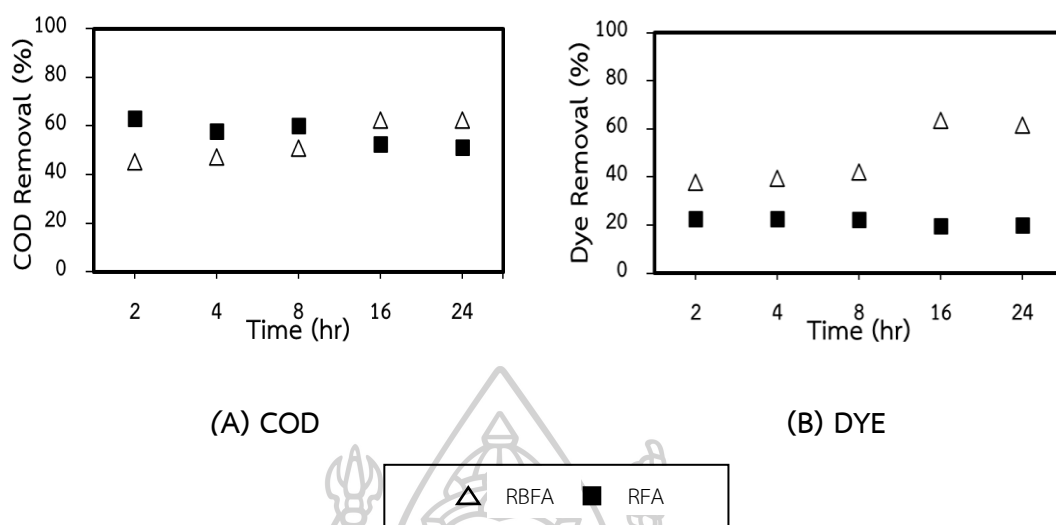
(2008) ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีเอคทีฟชนิด Remazol Red ด้วยถ้ำลอย พบว่า ถ้ำลอยขนาด 112.5 ไมครอน มีประสิทธิภาพดูดซับสีย้อมสูงที่สุด ที่ร้อยละ 99.9 ขณะที่ถ้ำลอยขนาด 45 ไมครอน มีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 97.2 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 9 ขนาดถ้ำลอยต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์

4.3.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ COD และสีย้อมในน้ำสีย้อมสังเคราะห์ B-SWW โดยใช้ค่า pH ที่ 7 และ 8 สำหรับถ้ำลอย RBFA และ RFA ตามลำดับ และใช้ถ้ำลอยรวมทุกขนาด (ผลทดสอบข้อ 4.3.1 และ 4.3.2) ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร กวนผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บน้ำส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอนทุก ๆ 2 ชั่วโมงมาวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์ จากรูปที่ 10 พบว่าร้อยละการดูดซับ COD และสีย้อมของถ้ำลอยทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 10 เวลาสัมผัสต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์

โดยถ้ำลอย RBFA มีแนวโน้มการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง โดยค่าร้อยละการดูดซับ COD และสีย้อมที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 62.72 ± 0.00 และ 63.51 ± 3.59 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง สอดคล้องกับ Zaharia & Suteu (2013) พบว่า ถ้ำลอยถ่านหินสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีในช่วงเวลาเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนคงที่ที่เวลา 16.5–24 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการศึกษาของพรสวรรค์ และคณะ (2553) อธิบายไว้ว่าการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใด ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับตัวดูดซับ ทั้งนี้เมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุลระยะเวลาจะไม่มีผลใด ๆ กับการดูดซับ ในขณะที่ถ้ำลอย RFA มีร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัสเพียง 2 ชั่วโมงเท่านั้น และมีร้อยละการดูดซับ COD สูงกว่าถ้ำลอย RBFA แต่อย่างไรก็ตามถ้ำลอย RFA มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมน้อยกว่าถ้ำลอย RBFA ซึ่งร้อยละการดูดซับสีย้อมที่ดีที่สุดมีค่า 22.62 ± 0.86 ที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง เนื่องจากถ้ำลอย RFA และถ้ำลอย RBFA มีปริมาณ SiO_2 ที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้ำลอย RFA มีปริมาณ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 91.35 มากกว่าถ้ำลอย RBFA โดย SiO_2 มีคุณสมบัติในการดูดซับ เป็นส่วนประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในสารละลายได้ ส่งผลให้เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาสัมผัสเริ่มแรก จนอนุภาคถูกดูดติดเต็มพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับ จึงส่งผลให้ค่อย ๆ อิ่มตัวเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Kuang, Zhang, & Zhou (2020) พบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับสีเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที หรือ 2 ชั่วโมง ซึ่งเกิดการดูดซับ

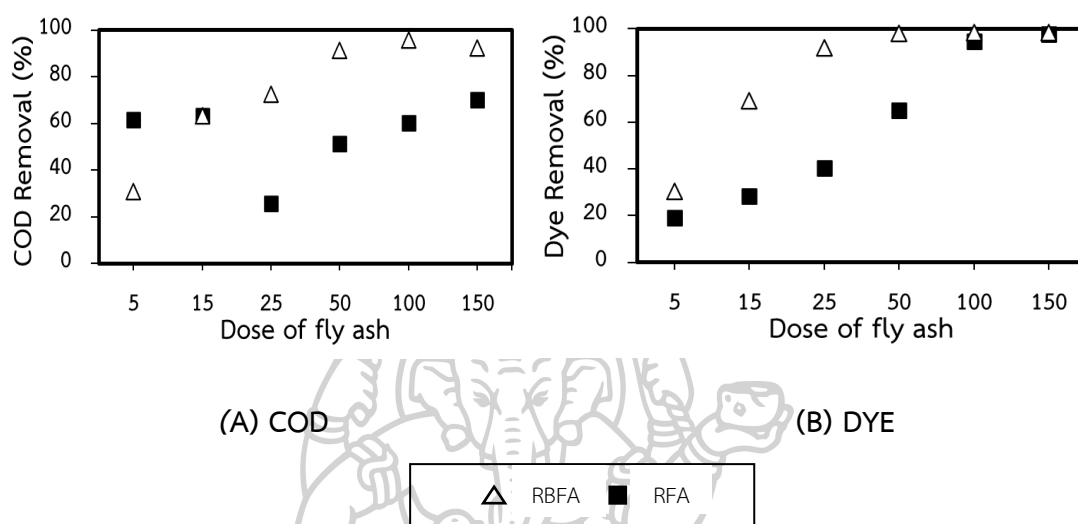
เป็น 2 ช่วง คือในช่วงแรกเกิดการดูดซับสีอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาสัมผัส 5-30 นาที และช่วงที่สองเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มการดูดซับคงที่

4.3.4 ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1- 4.3.3 นำมาใช้ทดสอบหาปริมาณเถ้าลอย RBFA และ RFA ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการดูดซับ COD และสีข้อมในน้ำสีข้อมสังเคราะห์ B-SWW ใช้ปริมาณเถ้าลอย 5 15 25 50 100 และ 150 กรัมต่อลิตร สำหรับเถ้าลอย RBFA ทดสอบโดยใช้ค่า pH 7 เถ้าลอยรวมทุกขนาด ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 16 ชั่วโมง เถ้าลอย RFA ทดสอบโดยใช้ค่า pH 8 เถ้าลอยรวมทุกขนาด ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 2 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาทิ้งให้ตกตะกอนนำน้ำส่วนใสที่ได้มาวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับ COD และสีข้อมของเถ้าลอย RBFA และ RFA มีค่าร้อยละการดูดซับ COD เท่ากับ 31.02 ± 4.65 63.48 ± 0.00 72.61 ± 3.04 91.38 ± 0.88 95.94 ± 0.88 และ 92.39 ± 1.52 สำหรับเถ้าลอย RBFA 61.68 ± 1.04 63.48 ± 1.04 25.76 ± 2.74 51.50 ± 1.80 60.48 ± 1.80 และ 70.06 ± 7.48 สำหรับเถ้าลอย RFA จากรูปที่ 11 A อธิบายได้ว่าเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD แตกต่างกัน โดยเถ้าลอย RBFA มีการดูดซับสูงสุดที่ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 95.94 ± 0.88 ใช้ปริมาณเถ้าลอย 100 กรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าร้อยละการดูดซับ COD ของเถ้าลอย RFA ที่มีค่าร้อยละเท่ากับ 70.06 ± 7.48 ใช้ปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 150 กรัมต่อลิตร เห็นได้ว่าเถ้าลอย RFA หากแม้ใช้ปริมาณเถ้าลอยมากกว่าแต่มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำกว่าเถ้าลอย RBFA คิดเป็นร้อยละ 26.97 เนื่องจากเถ้าลอย RBFA มีรูพรุนและพื้นที่ผิวเฉลี่ยมากกว่าเถ้าลอย RFA ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสำหรับให้อนุภาคของสารอินทรีย์ดูดติดพื้นผิวได้สูง (หัวข้อ 4.2) และจากรูปที่ 11 A เห็นได้ว่าเถ้าลอย RFA มีประสิทธิภาพการดูดซับ COD มากกว่าร้อยละ 60 เมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอย 5 กรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงร้อยละ 25 เมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยที่ 25 กรัมต่อลิตร จากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้เถ้าลอยมากกว่า 25 กรัมต่อลิตร เกิดจากการคายซับชั่วคราว หรืออาจเกิดจากผลของสัดส่วนเถ้าลอย เนื่องจากการทดสอบใช้เถ้าลอยรวมทุกขนาด มีหลายขนาดปะปน จึงมีโอกาสใช้เถ้าลอยที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้น้อย เช่น ในหัวข้อ 4.3.2 พบว่า เถ้าลอยขนาด 75 ไมครอนให้ประสิทธิภาพการดูดซับ COD เพียงร้อยละ 28-34 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีข้อมน้อยที่สุดถึงแม้มีขนาดเล็กที่สุด

สำหรับร้อยละการดูดซับสีข้อมพบว่า เถ้าลอย RBFA มีค่าการดูดซับสูงสุดร้อยละ 98.39 ± 0.17 โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย 100 กรัมต่อลิตร และเถ้าลอย RFA มีค่าการดูดซับสูงสุดร้อยละ 97.55 ± 0.59 โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย 150 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามจากรูป 11 (B) เห็นได้ว่าเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดมีร้อยละการดูดซับสีข้อมใกล้เคียงกันเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยในช่วง 100-150 กรัมต่อลิตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lalani & Usman (2020) พบว่า ร้อยละการดูดซับ COD และสีข้อม

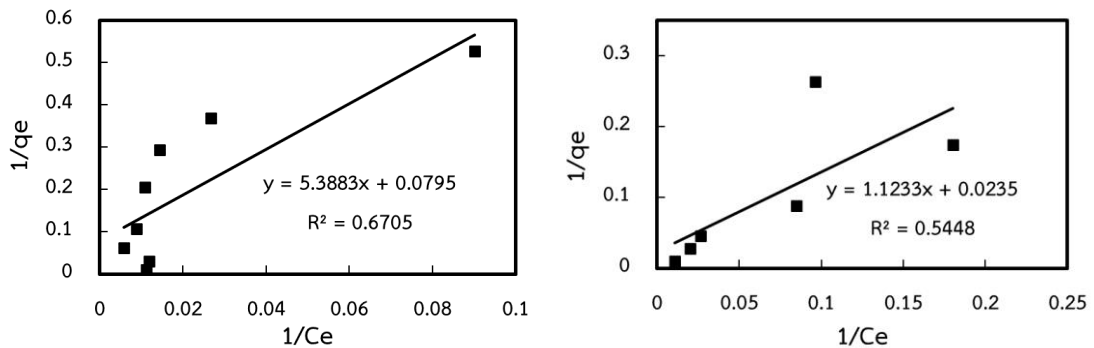
เพิ่มขึ้นต่อเนื่องเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ และ Rachakomkij, Ruangchuay, & Teachakulwiroj (2004) พบว่า เถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอกทีฟประมาณร้อยละ 94 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยชานอ้อย เป็น 120 กรัมต่อลิตร ค่าร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับร้อยละ 98



รูปที่ 11 ปริมาณเถ้าลอยต่อร้อยละการดูดซับค่า COD และสีย้อมสังเคราะห์

4.4 ผลของไอโซเทอมการดูดซับ

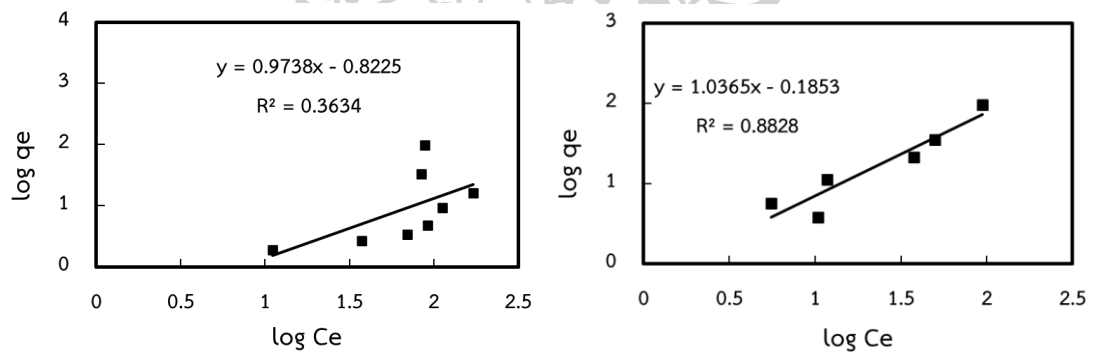
จากข้อมูลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.4 เมื่อนำผลของปริมาณเถ้าลอย RBFA และ RFA ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ COD มาพิจารณาความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมของฟรุนดิช (Freundlich isotherm) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการดูดซับ (R^2) ไอโซเทอมของแลงเมียร์ มีค่าเท่ากับ 0.5448 และ 0.6705 สำหรับเถ้าลอย RBFA และ RFA ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการดูดซับ (R^2) ไอโซเทอมของฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 0.8828 และ 0.3634 ตามลำดับ กล่าวคือเถ้าลอย RBFA สอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดิช มีค่า $1/n$ เท่ากับ 1.0365 หรือมีค่าประมาณ 1 แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบเส้นตรง (Rohaiza, Hadi, Sien, 2013) และมีค่า K_f เท่ากับ 0.653 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพฤติกรรมของการดูดซับของไอโซเทอมฟรุนดิชเป็นลักษณะการดูดซับทางกายภาพ มีการซ้อนทับกันของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีอิสระในการจับหรือยึดเกาะได้ทั่วพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นแบบหลายชั้น และมีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (อิสริยาภรณ์ บุญยืน, 2552)



(A) ถ้ำลอย RBFA

(B) ถ้ำลอย RFA

รูปที่ 12 ไอโซเทอมแลงเมียร์ต่อการดูดซับ COD ของถ้ำลอย RBFA และ RFA



(A) ถ้ำลอย RBFA

(B) ถ้ำลอย RFA

รูปที่ 13 ไอโซเทอมฟรุนดิชต่อการดูดซับ COD ของถ้ำลอย RBFA และ RFA

ในขณะที่ถ้ำลอย RFA สอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของตัวดูดซับถูกดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว (mono layer adsorption) ไม่มีการซ้อนทับ แต่ละพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีลักษณะการดูดซับแบบเดียวกัน และมีตำแหน่งการดูดซับบนพื้นผิวที่แน่นอนของตัวดูดซับ (วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, 2558) เห็นได้ว่าถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิดมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแตกต่างกัน เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของถ้ำลอยมีความสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิว หากมีปริมาณพื้นที่ผิวมากส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมากเช่นเดียวกัน นั่นคือ ถ้ำลอย RBFA มีค่าพื้นที่ผิวมากกว่าถ้ำลอย RFA จึงดูดซับได้ดีกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์ และคณะ

(2556) ได้ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับตะกั่วด้วยถ้ำลอย ถ้ำไม้ และถ้ำชานอ้อย รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับ พบว่า ถ้ำลอยทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วต่างกัน โดยถ้ำชานอ้อยสามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงสุด

4.5 สรุปผลของสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD และสีด้วยถ้ำลอย

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ COD และสีในหัวข้อ 4.3.1-4.3.4 ด้วยถ้ำลอย 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่าถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิด มีสภาวะที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน โดยถ้ำลอยไม้ยางพารา (RBFA) มีประสิทธิภาพการดูดซับ COD และสีจากน้ำเสียสังเคราะห์น้ำเงิน (B-SWW) ที่ pH 7 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 100 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีสูงสุดประมาณร้อยละ 96 และ 98 ตามลำดับ และมีแนวโน้มการดูดซับเข้าสู่สมดุลและคงที่ภายหลังระยะเวลาสัมผัส 18 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 11 A และ B แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณถ้ำลอย RBFA 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งใช้ปริมาณที่น้อยกว่าถ้ำลอย 100 กรัมต่อลิตร (คิดเป็นร้อยละ 50) แต่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าช่วงปริมาณถ้ำลอยที่เหมาะสมมีค่า 50-100 กรัมต่อลิตร สำหรับผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ้ำลอย RBFA สอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดลิช ด้วยค่า R^2 0.8828 ขณะที่ถ้ำลอยแกลบ (RFA) มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 8 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 150 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีสูงสุดประมาณร้อยละ 70 และ 98 ตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ้ำลอย RFA สอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ ด้วยค่า R^2 0.5355 เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว อย่างไรก็ตามสภาวะที่ควรระวัง คือ ระยะเวลาสัมผัส เนื่องจากถ้ำลอยแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ระยะเวลาต่างกัน หากเลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมนอกจากให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดแล้ว ยังเพิ่มความสามารถหรือยืดอายุการใช้งานของถ้ำลอยได้อีกเช่นกัน จากการศึกษาเห็นได้ว่าถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิดมาใช้เป็นวัสดุดูดซับที่สามารถปรับสภาพน้ำเสียเพื่อลดสารอินทรีย์ในรูป COD และสี แต่ยังคงต้องมีการบำบัดขั้นต่อไป เพื่อลดสารแขวนลอยที่เกิดจากถ้ำลอยขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบต่อด้วยการใช้ระบบการกรองทรายแบบกรองช้า (slow sand filtration) เป็นการขยายผลโดยใช้ขนาดการทดลองที่ใหญ่ขึ้น (pilot model) เพื่อปรับสภาพน้ำให้มีคุณภาพก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นชนิดของถ้ำลอยและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป คือ ถ้ำลอยไม้ยางพารา (RBFA) ที่ pH 7 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 50 กรัมต่อลิตร

4.6 ผลศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (Pilot model)

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยเถ้าลอยไม่ยางพารา (RBFA) มีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 ลักษณะน้ำเสีย

การทดสอบนี้ใช้น้ำตัวอย่างเข้าระบบ 2 ชนิดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์และจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก โดยน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน (B-SWW) มีลักษณะโปร่งแสง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของสีย้อมแขวนลอย จึงส่งผลให้มีค่า COD เฉลี่ยเท่ากับ 587.73 ± 5.54 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกมีลักษณะสีเขียวปนฟ้า มีความเหนียวเล็กน้อย และมีไข (wax) ลอยปะปนอยู่เหนือผิวน้ำ เนื่องจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกในรอบนี้เป็นน้ำจากขั้นตอนการล้างโซเดียมซัลไฟเกต (SW-BWW) และมีการล้างซ้ำหลายรอบ จึงทำให้น้ำมีปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยมีค่า COD เท่ากับ $3,512 \pm 179.91$ มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ พบว่า TSS และ TDS เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ต้องไม่เกิน 50 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 12)

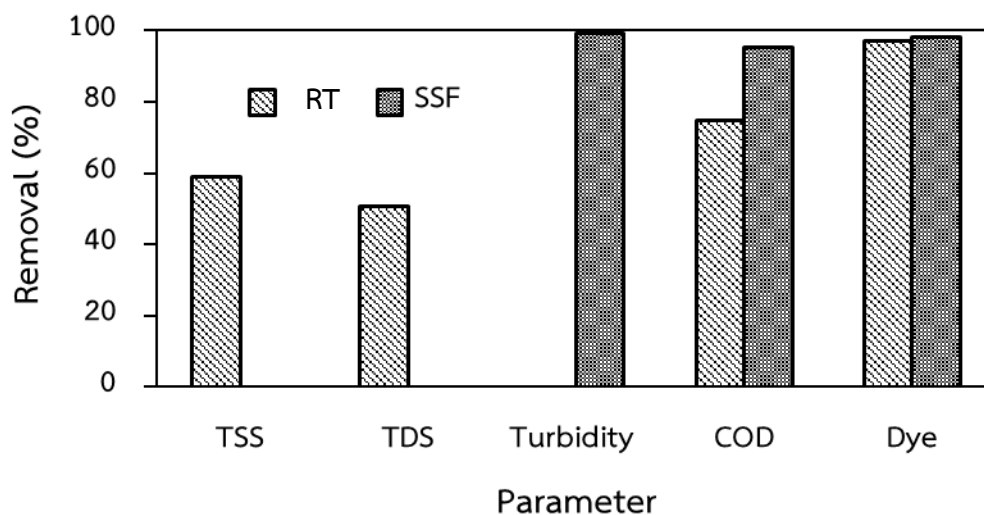
4.6.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด

4.6.2.1 น้ำสีย้อมสังเคราะห์

ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของน้ำสีย้อมสังเคราะห์ เป็นเวลาต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง โดยควบคุมให้มีค่า pH 7 ตลอดทั้งระบบ กวนผสมที่ 90 รอบต่อนาที พบว่าน้ำเสียจากสีย้อมสังเคราะห์เริ่มต้นในถังพักน้ำเสียมียค่า TSS TDS และความขุ่น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.83 ± 0.71 858.33 ± 106.07 และ 4.27 ± 0.25 ตามลำดับ สำหรับ pH มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.83 ± 0.04 และ COD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 587.73 ± 5.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (กำหนดให้ pH อยู่ในช่วง 5-9 และ COD มีค่าไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร, ตารางที่ 12)

เมื่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (RT) เพื่อผสมกับเถ้าลอย RBFA และเมื่อกวนผสมจนครบระยะเวลา ทิ้งให้ตกตะกอน นำน้ำส่วนใสที่ได้มาวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์ พบว่า TSS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.50 ± 5.57 มิลลิกรัมต่อลิตร และ TDS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 418.33 ± 25.93 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลด TSS และ TDS ร้อยละ 58.75 และ 50.70 ตามลำดับ สำหรับค่า COD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 148.27 ± 9.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังคงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ในรูป COD ร้อยละ 74.77 และประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีค่าร้อยละ 97.05 เมื่อเทียบกับผล

การทดลองแบบกะในหัวข้อ 4.3.4 พบว่า ระบบทดลองขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมลดลงร้อยละ 18.12 และ 1.36 ตามลำดับ เกิดได้จากปัจจัยทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของน้ำ การตกตะกอน และปริมาณสารแขวนลอยที่แตกต่างกัน โดย Malmqvist, Gunnarsson & Torstenon (1998) กล่าวว่า การทดลองขนาดใหญ่ (pilot system) มีความเป็นไปได้ยากที่จะได้ประสิทธิภาพเหมือนกันกับการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากต้องอาศัยความระมัดระวังและการควบคุมระบบที่ดี ผลจากการเปรียบเทียบขนาดการทดลอง พบว่า การทดลองระดับห้องปฏิบัติการให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงกว่าการทดลองขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Thuy et al., (2021) พบว่า เมื่อเพิ่มขนาดการทดลองทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD และสีย้อมลดลง ระหว่างร้อยละ 1.5-2.07 และ 0.62-1.52 ตามลำดับ



รูปที่ 14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดในถังกรองทรายแบบกรองช้า (SSF) เมื่อนำสารละลายส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอนป้อนเข้าสู่ถังกรองทรายแบบกรองช้า โดยมีค่าอัตราการป้อนน้ำเข้าเท่ากับ 3.5 นาทีต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการกรองเฉลี่ย 2.35 ชั่วโมง อัตราไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.0045 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คิดเป็นอัตราการกรอง 0.130 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง (คำนวณจากการจับเวลาขณะที่น้ำไหลออกจากถังกรองทราย) พบว่า น้ำที่ออกจากถังทรายกรองเข้าสู่ถังเก็บน้ำหลังบำบัดมีลักษณะใส มีค่าความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.4511 ± 0.11 เอ็นทียู ลดลงจากน้ำเสียเริ่มต้น (ตารางที่ 13) คิดเป็นร้อยละการกำจัดเท่ากับ 99.78 มีค่า COD เฉลี่ยเท่ากับ 34.20 ± 13.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงจากน้ำเสียเริ่มต้น คิดเป็นร้อยละ 99.03 และประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม คิดเป็นร้อยละ 83.53 (รูปที่ 15) ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับหัวข้อ 4.6.2.1 กล่าวคือ

การกรองทรายแบบกรองช้าสามารถปรับสภาพน้ำ โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และ สีย้อมร้อยละ 35.83 และ 11.43 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัย Rahmadyanti, Wiyono, & Firmansyah (2020) ที่ใช้ระบบกรองชีวภาพ โดยใช้ทรายกรองขนาด 1-2 มิลลิเมตร เป็นวัสดุกรอง พบว่า การกรองทรายสามารถกำจัด TSS และ COD ได้มีค่าร้อยละ 95.85 และ 72.67 ตามลำดับ สำหรับมีค่า HRT 3 วัน



ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอมสังเคราะห์สีน้ำเงิน

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง			
	B-SWW	RT	SSF	ร้อยละ ค่ามาตรฐาน*
pH	10.83±0.04	7.12±0.08	7.32±0.09	- 5.5-9
TSS (mg/L)	12.83±0.71	5.50±5.57	-	58.75 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
TDS (mg/L)	858.33±106.07	418.33±25.93	-	50.70 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
Turbidity (NTU)	4.27±0.25	-	0.04±0.03	99.20 5 NTU
COD (mg/L)	587.73±5.54	148.27±9.60	27.73±5.54	95.29 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
Dye	3.0006±0.02	0.0884±0.00	0.0563±0.00	98.12 ไม่พียงก็ยจ

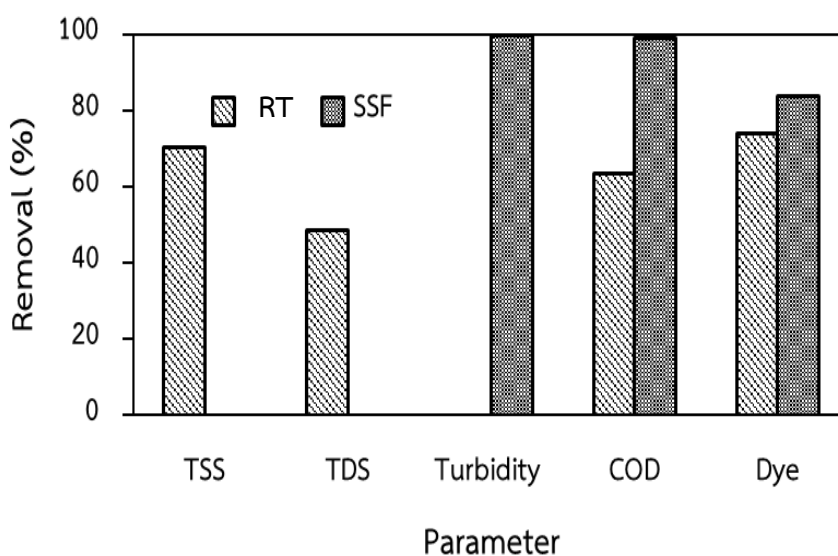
หมายเหตุ : B-SWW คือ น้ำเสียอมสังเคราะห์สีน้ำเงิน RT คือ ถึงปฏิกรณ์ RT คือ ถึงกรองทรายแบบกรองช้า

* มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2560)

4.6.2.2 น้ำจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก ในขั้นตอนการล้างโซเดียมซัลไฟด์ออกจากผ้า (SW-BWW) เป็นเวลาต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง โดยควบคุมให้มีค่า pH 7 ตลอดทั้งระบบ กวนผสมที่ 90 รอบต่อนาที พบว่า น้ำเสีย SW-BWW เริ่มต้นในถังพักน้ำเสียมีค่าพารามิเตอร์เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม โดย pH TSS TDS ความขุ่น และ COD มีค่าเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 10.74 ± 0.11 $1,400.67 \pm 284.76$ $20,420.56 \pm 927.24$ 208.33 ± 0.00 และ $3,512.53 \pm 179.91$ ตามลำดับ (ตารางที่ 13)

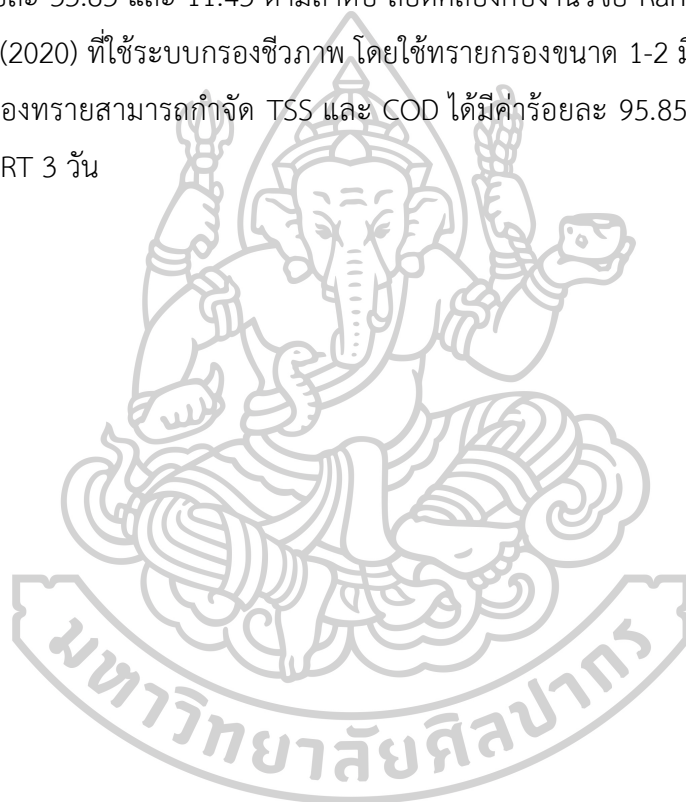
เมื่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เพื่อผสมกับเถ้าลอย RBFA และกวนผสมจนครบระยะเวลา ทิ้งให้ตกตะกอน นำน้ำส่วนใสที่ได้มาวิเคราะห์พารามิเตอร์ พบว่า ขั้นตอนนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียประมาณร้อยละ 50 โดยค่า TSS และ TDS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 403.33 ± 5.57 และ $10,505.56 \pm 353.68$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด TSS และ TDS ของการบำบัดร้อยละ 70.31 และ 48.48 ตามลำดับ สำหรับค่า COD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,276.80 \pm 140.53$ มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังคงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเช่นเดิม คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ในรูป COD ร้อยละ 63.45 และประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมคาร์บอนร้อยละ 73.94 (รูปที่ 15)



รูปที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดในถังกรองทรายแบบกรองช้า (SSF) เมื่อนำสารละลายส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอนป้อนเข้าสู่ถังกรองทรายแบบกรองช้า โดยมีค่าอัตราการป้อนน้ำเข้าเท่ากับ 3.5 นาทีต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการกรองเฉลี่ย 2.35 ชั่วโมง อัตราไหลเฉลี่ยเท่ากับ

0.0045 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คิดเป็นอัตราการกรอง 0.130 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง (คำนวณจากการจับเวลาขณะที่น้ำไหลออกจากถังกรองทราย) พบว่าน้ำที่ออกจากถังทรายกรองเข้าสู่ถังเก็บน้ำหลังบำบัดมีลักษณะใส มีค่าความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.4511 ± 0.11 เอ็นทียู ลดลงจากน้ำเสียเริ่มต้น (ตารางที่ 13) คิดเป็นร้อยละการกำจัดเท่ากับ 99.78 มีค่า COD เฉลี่ยเท่ากับ 34.20 ± 13.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงจากน้ำเสียเริ่มต้น คิดเป็นร้อยละ 99.03 และประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมคิดเป็นร้อยละ 83.53 (รูปที่ 15) ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับหัวข้อ 4.6.2.1 กล่าวคือ การกรองทรายแบบกรองช้าสามารถปรับสภาพน้ำ โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีข้อมร้อยละ 35.83 และ 11.43 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัย Rahmadyanti, Wiyono, & Firmansyah (2020) ที่ใช้ระบบกรองชีวภาพ โดยใช้ทรายกรองขนาด 1-2 มิลลิเมตร เป็นวัสดุกรอง พบว่า การกรองทรายสามารถกำจัด TSS และ COD ได้มีค่าร้อยละ 95.85 และ 72.67 ตามลำดับ สำหรับมีค่า HRT 3 วัน



ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากระบบการผลิตผ้าบาติก

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง				
	SW-BWW	RT	SSF	ร้อยละ	ค่ามาตรฐาน*
pH	10.74±0.11	7.14±0.04	7.28±0.03	-	5.5-9
TSS (mg/L)	1,400.67±284.76	403.33±5.57	-	70.31	50 มิลลิกรัมต่อลิตร
TDS (mg/L)	20,420.56±927.24	10,505.56±353.68	-	48.48	3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
Turbidity (NTU)	208.33±0.00		0.4511±0.11	99.78	5 NTU
COD (mg/L)	3,512.53±179.91	1,276.80±140.53	34.20±13.42	99.03	120 มิลลิกรัมต่อลิตร
Dye	0.3863±0.00	0.1007±0.00	0.0635±0.00	83.53	ไม่น่ารังเกียจ

หมายเหตุ : SW-BWW คือ น้ำล้างโซเดียมซัลเฟต RT คือ ถึงปฏิกิริยาSSF คือ ถึงกรองทรายแบบกรองช้า

* มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2560)

4.6.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

จากการทดสอบในหัวข้อ 4.6.2.1 และ 4.6.2.2 พบว่า เมื่อควบคุมการทดสอบที่สภาวะที่เหมาะสมของชนิดของเถ้าลอย แต่ใช้ชนิดของน้ำเสียต่างกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน จากตารางที่ 14 เห็นได้ว่าเถ้าลอย RBFA มีประสิทธิภาพในการบำบัดเมื่อใช้ในน้ำเสียอมสังเคราะห์สีน้ำเงิน (B-SWW) มากกว่าน้ำจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกในขั้นตอนการล้างโซเดียมซัลเฟต (SW-BWW) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตัวอย่างจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกนั้นมีส่วนประกอบที่แตกต่างจากน้ำเสียอมสังเคราะห์ เช่น สารซักฟอก น้ำส้มสายชู และโซเดียมซัลเฟต ซึ่งโซเดียมซัลเฟตทำให้น้ำตัวอย่างมีสภาวะเป็นด่างแก่ (ค่า pH ประมาณ 10-11) ทำให้ค่า pH สูงกว่าค่า pH ที่พื้นผิวเป็นศูนย์ (the point of zero charge, pH_{pzc}) ส่งผลให้เถ้าลอย RBFA มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง โดย Yagub, Sen, Afroze, & Ang (2014) กล่าวว่า การดูดซับสารละลายสี้อมที่มีประจุลบ (cationic dye) มักเกิดที่สภาวะ pH ที่มีค่าสูงกว่า pH_{pzc} ในขณะที่การดูดซับสารละลายสี้อมที่มีประจุบวก (anionic dye) มักเกิดที่สภาวะ pH ที่มีค่าต่ำกว่า pH_{pzc} กล่าวคือหากค่า pH ของน้ำเสียนั้นมีค่าต่ำกว่าค่า pH_{pzc} หมายความว่าวัสดุดูดซับชนิดนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับมาก นอกจากนี้อัตราการกรองและอัตราการไหลมีค่าต่างกัน เป็นผลมาจากเกิดชั้นเค้กบนผิวหน้าของทรายกรองขณะกรองน้ำ SW-BWW ส่งผลให้เกิดการสะสมของชั้นของแข็งแขวนลอยและบางส่วนอุดตันภายในถังกรองทรายมากกว่าน้ำเสียอมสังเคราะห์ B-SWW เนื่องจากโซเดียมซัลเฟตที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างทำให้น้ำและเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเมือก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง อีกทั้งการตกตะกอนของเถ้าลอยภายหลังการดูดซับและของแข็งแขวนลอยเป็นไปได้อย่างขึ้น ดังนั้นการใช้โซเดียมซัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสมกับชิ้นงานสามารถลดการใช้สารเคมีและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดหรือปรับสภาพน้ำเสียได้ รวมถึงลดภาระในการจัดการเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับแล้ว

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

น้ำตัวอย่าง	หน่วยของระบบ	ร้อยละ				
		TSS	TDS	Turbidity	COD	Dye
B-SWW	RT	58.75	50.70	-	74.77	97.05
	SSF	-	-	99.20	95.29	98.12
SW-BWW	RT	70.31	48.48	-	63.45	73.94
	SSF	-	-	99.78	99.03	83.53

4.6.4 สรุปผลของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (Pilot model)

จากผลศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของน้ำเสียทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่าการขยายผลโดยใช้ขนาดการทดลองที่ใหญ่ขึ้นยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าร้อยละ 60 ถึงแม้ว่าการทดลองแบบกะในหัวข้อ 4.3.4 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD และสีขุ่นมากกว่าร้อยละ 90 ก็ตาม อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านการกรองทรายแบบกรองช้าทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดเป็นร้อยละ 84-100 (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.82) เพิ่มขึ้นจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 37.39 เกิดจากกลไกการแยกและกักอนุภาคสารแขวนลอยอินทรีย์และเถ้าลอยขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ในถังปฏิกรณ์ การกรองทรายจึงช่วยลดความขุ่น COD และสีขุ่นได้ (Sandoval, Zamora-Castro, Vidal-Alvares, & Marin-Muniz, 2019) โดยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากน้ำสีขุ่นสังเคราะห์มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 58.75 50.70 99.20 95.29 และ 98.12 สำหรับพารามิเตอร์ TSS TDS ความขุ่น COD และสีขุ่นตามลำดับ โดยผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมทุกพารามิเตอร์เช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70.31 48.48 99.78 99.03 และ 83.53 สำหรับพารามิเตอร์ TSS TDS ความขุ่น COD และสีขุ่น ตามลำดับ โดยขณะเดินระบบพบว่าปัญหาจากความหนืดของน้ำ SW-BWW เกิดจากปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่มีปริมาณมาก ส่งผลให้เถ้าลอยดูดซับได้น้อย ตกตะกอนได้ยากขึ้น และส่งผลต่อการกรองทราย เนื่องจากเกิดชั้นเค้กบนหน้าทรายกรอง จึงต้องมีการตักชั้นเค้กและล้างย้อน (backwash) ก่อนเริ่มระบบรอบใหม่ เพื่อฟื้นฟูสภาพและนำกลับอัตราการกรองน้ำ ดังนั้นหากนำระบบที่ขยายขนาดการทดลองมาใช้งานในอุตสาหกรรมหรือครัวเรือน ควรมีการควบคุมปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ออกจากน้ำเสีย หากน้ำเสียมีกากตะกอนเทียนจากขั้นตอนการลงเทียนปนเปื้อนในน้ำเสีย ควรเพิ่มตะแกรงเพื่อดักแยกของแข็งออกจากน้ำเสียก่อนทำการทดลอง อีกทั้งควรกำหนด

ช่วงเวลาหรือรอบในการล้าง ฟันสภาพถึงกรองทรายเป็นประจำ ทั้งนี้ถ้าลอยที่ผ่านการใช้งานแล้วควรจัดการรวบรวมและเก็บกักไว้เพื่อนำส่งบริษัทรับกำจัดของเสียอันตรายที่ได้รับใบอนุญาต



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์และสีย้อมด้วยถ่านลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล 2 ชนิด คือ ถ่านลอยไม้ยางพาราและถ่านลอยแกลบ แล้วนำข้อมูลมาขยายผลในชุดการทดลองขนาดใหญ่ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ขนาดของถ่านลอย ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณของถ่านลอย และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ได้

ผลศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์ (COD) และสีย้อมด้วยถ่านลอยสองชนิด สรุปได้ดังนี้ ถ่านลอยทั้งสองชนิดมีสภาวะที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน โดยถ่านลอยไม้ยางพารา (RBFA) มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน (B-SWW) ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ pH 7 ด้วยถ่านลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ่านลอย 100 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมสูงสุดประมาณร้อยละ 96 และ 98 ตามลำดับ และมีแนวโน้มการดูดซับเข้าสู่สมดุลและคงที่ภายหลังระยะเวลาสัมผัส 18 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามหากใช้ปริมาณถ่านลอย RBFA 50 กรัมต่อลิตรสามารถให้ประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกับการใช้ถ่านลอยปริมาณ 100 กรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถลดการใช้ถ่านลอย อีกทั้งเป็นการลดภาระในการกำจัดถ่านลอยหลังการใช้งานอีกด้วย สำหรับผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านลอย RBFA สอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดลิช ด้วยค่า R^2 0.8828 ขณะที่ถ่านลอยแกลบ (RFA) มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน (B-SWW) ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ pH 8 ด้วยถ่านลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ่านลอย 150 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับ COD และสีย้อมสูงสุดประมาณร้อยละ 70 และ 98 ตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านลอย RFA สอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ ด้วยค่า R^2 0.5355 เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก โดยขยายผลในขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น (pilot model) จากผลการศึกษาเลือกใช้ถ่านลอยไม้ยางพารา (RBFA) ควบคุมสภาวะที่ pH 7 ด้วยถ่านลอยรวมทุกขนาด ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง ความเร็วในการกวนผสม 90 รอบต่อนาที โดยใช้ปริมาณถ่านลอย 50 กรัมต่อลิตร เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อมสูงกว่าถ่านลอยแกลบ (RFA) สามารถลดของเสียจากถ่านลอยหลังบำบัด จึงมีความคุ้มค่าและเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน ผลการศึกษาสรุปดังนี้ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของน้ำเสียทั้งสองชนิด (น้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน B-SWW และน้ำจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก ขั้นตอนการล้างน้ำยาเคลือบโซเดียมซัลไฟด์ SW-BWW) เมื่อขยายผลโดยใช้ขนาด

การทดลองที่ใหญ่ขึ้น ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าร้อยละ 60 และเมื่อผ่านการกรองทรายแบบกรองซ้ำทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยร้อยละ 95.82 เพิ่มขึ้นจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 37.39 ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมทุกพารามิเตอร์

ถ้ำลอยสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับทางเลือก แทนการใช้วัสดุดูดซับราคาสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมการผลิตผ้าบาติก ในการกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อม ในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งถือเป็นการนำของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม มาเพิ่มมูลค่าและใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้การปรับคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้นด้วยถังกรองทรายเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพน้ำเสีย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในบางกิจกรรมของกระบวนการผลิตผ้าบาติก ซึ่งช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายได้ โดยระบบมีขนาดกะทัดรัด ใช้วัสดุประกอบระบบที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น และสามารถประกอบระบบเองได้ ไม่ซับซ้อน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งแก่ผู้ประกอบการผลิตผ้าบาติก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณน้ำเสีย และส่วนประกอบของน้ำเสีย เพื่อลดภาระในการดูดซับของถ้ำลอย

5.2.2 ศึกษาปริมาณการใช้โซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการลดต้นทุนจากการใช้สารเคมีและการจัดการของเสียจากถ้ำลอย

รายการอ้างอิง

- Abdel Salam, O. E., Reiad, N. A., & ElShafei, M. M. (2011). A study of the removal characteristics of heavy metals from wastewater by low-cost adsorbents. *Journal of Advanced Research*, 2(4), 297-303.
- Akpomie, K. G., & Dawodu, F. A. (2015). Treatment of an automobile effluent from heavy metals contamination by an eco-friendly montmorillonite. *Journal of Advanced Research*, 6(6), 1003-1013.
- Assila, O., Tanji, k., Zouheir, M., Arrahli, A., Nahali, L., Zerrouq, F., & Kherbeche, A. (2020). Adsorption studies on the removal of textile effluent over two natural eco-friendly adsorbent. *Journal of Chemistry*, 1-13.
- Bisht, D., Sinha, S., Nigam, S., Bisaria, K., Mehrotra, T., & Singh, R. (2021). Adsorptive decontamination of paper mill effluent by nano fly ash, response surface methodology, adsorption isotherm and reusability studies, *Water Science and Technology*, 1662-1675.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal the American Chemical Society*, 60:309-319.
- Chandra, S. (1997). *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*. Noyes Publications, New Jersey : USA.
- Chen, Y., Wang, B., Xin, J., Sun, P., & Wu, D. (2018). Adsorption behavior and mechanism of Cr(VI) by modified biochar derived from *Enteromorpha prolifera*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 440-447.
- Dizge, N., Aydiner, C., Demirbas, E., Kobya, M., & Kara, S. (2008). Adsorption of reactive dyes from aqueous solutions by fly ash: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 737-746.
- Faust, S. D., & Aly, O. M. (1987). *Adsorption process for water treatment*. United States of America: Butterworth.
- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution, *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385-470.
- Fu, Y., Liu, X., & Chen, G. (2019). Adsorption of heavy metal sewage on nano-materials

- such as titanate/TiO₂ added lignin. *Results in Physics*, 12, 405-411.
- Genesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675-1683.
- Ginosar, D. M., Petkovic, L. M., & Burch, K. C. (2011). Commercial activated carbon for the catalytic production of hydrogen via the sulfur-iodine thermochemical water splitting cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(15), 8908-8914.
- Gupta, V. K., Jain, C. K., Ali, I., Sharma, M., & Saini, V. K. (2003). Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. *Water Research*, 37(16), 4038-4044.
- Harja, M., Ciobanu, G., Favier, L., Bulgariu, L., & Rusu, L. (2016). Adsorption of crystal violet dye onto modified ash. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi*, 62(1), 27-37.
- Hegazi, H. A. (2013). Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents. *HBRC Journal*, 9(3), 276-282.
- Hsu, T. C. (2008). Adsorption of an acid dye onto coal fly ash. *Fuel*, 87(13), 3040-3045.
- Juniar, H., Said, M., Haryati, S., & Faizal, M. (2016). Removal of COD and TSS from dye solution using sand filtration and adsorption. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 67-71.
- Kitchainukul, W. (2013). Adsorption of mercury contaminated synthetic water by fly ash from coal fired power plant. *Bulletin of Applied Science.*, 2(2), 35-39.
- Kuang, Y., Zhang, Z., & Zhou, S. (2020). Adsorption of methylene blue in water onto activated carbon by surfactant modification, *Water*, 12(2): 587.
- Kumar, J., Balomajumder, C., & Mondal, P. (2011). Application of agro-based biomasses for zine removal from wastewater—a review. *Clean-Soil, Air, Water*, 39(7), 641-652.
- Lalani, V., & Usman, S. M. (2020). A study on removal of pollutants using fly ash adsorbent from dyes wastewater, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 7(5), 417-42.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and

- platinum, *Journal of the American Chemical Society*, 40, 1361-1403.
- Lu, L., Lin, Y., Chai, Q., He, S., & Yang, C. (2018). Removal of acenaphthene by biochar and raw biomass with coexisting heavy metal and phenanthrene. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 558, 103-109.
- Malmqvist, A., Gunnarsson, L., & Torstenon, C. (1998). Lab and pilot scale as tools for upgrading-comparison with full scale results. *Water Science and Technology*, 37(9), 25-31.
- Mamitiana, R. R., Ding, J., Zhang, S., Jiang, H., & Zou, H. (2018). Sorption and desorption of selected pharmaceuticals by polyethylene microplastics, *Marine Pollution Bulletin*, 136, 516-523.
- Marañón, E., & Sastre, H. (1992). Behaviour of lignocellulosic apple residues in the sorption of trace metals in packed beds. *Reactive Polymers*, 18(2), 173-176. .
- Patel, H. (2021). Characterization and adsorptive treatment of distillery spent wash using bagasse fly ash. *Arabian Journal for Science and engineering*, 1-11.
- Patil, C., Kalburgi, P. B., Patil, M. B., & Prakash, K. B. (2018). An investigation on the micro structural and elemental composition of sugarcane bagasse ash blended concrete using SEM and EDS technique. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 8(3), 54-66.
- Patra, G., Barnwal, R., Behera, S. K., & Meikap, B. C. (2018). Removal of dyes from aqueous solution by sorption with fly ash using a hydrocyclone. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5204-5211.
- Pengthamkeerati, P., Satapanajaru, T., & Singchan, O. (2008). Sorption of reactive dye from aqueous solution on biomass fly ash. *Journal of hazardous materials*, 153(3), 1149-1156.
- Phihusut, D., & Chantharat, M. (2017). Removal of methylene blue using agricultural waste: A case study of rice husk and rice husk ash from chaipattana rice mill demonstration center. *Environment and Natural Resources Journal*, 15(2), 30-38.
- Rachakornkij, M., Ruangchuay, S., & Teachakulwiroj, S. (2004). Removal of reactive dyes from aqueous solution using bagasse fly ash, *Songklanakarin Journal Science Technology*, 26(1): 13-24.
- Rahmadyanti, E., Wiyono, A., & Firmansyah, G. A. (2020). Integrated system of biofilter

- and constructed wetland for sustainable batik industry, *International Journal of GEOMATE*, 70(18), 138-148.
- Rohaizar, N. A. B., Hadi, N. A. B., & Sien, W. C. (2013). Removal of Cu (II) from water by adsorption on chicken eggshell, *International Journal of Engineering & Technology*, 13(1), 40-45.
- Ruiying, G., & Jianlong, W. (2007). Effect of pH and temperature on isotherm parameter of chlorphenols biosorption to anaerobic granular. *Journal hazardous materials*, 145, 398-043.
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Alvares, M., & Marin-Muniz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plant in constructed wetlands for wastewater treatment: A Review, *Applied Sciences*, 9, 685.
- Siddiqui, M. F., Wahid, Z. A., & Sakinah, M. (2011). Bioremediation and biofouling perspective of real batik effluent by indigenous bacteria, *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2(5), 302-308.
- Singh, B. (2018). Rice husk ash, Water and Supplementary cementitious Materials in Concrete, 417-460.
- Sivalingam, S., & Sen, S. (2020). Rice huck ash derived nanocrystalline ZSM-5 for highly efficient removal of a toxic textile dye, *Journal of Materials Research and Technology*, 9: 14853-14864.
- Thuy, N. T., Hoam, N. X., Thanh, D. V., Khoa, P. M., Thi, N. T., Hoang, P. Q. H., & Huy, N. N. (2021). Application of electrocoagulation for printing wastewater treatment from laboratory to pilot scale. *Journal of Electrochemical Science and technology*, 12(1), 21-32.
- Tiwari, R. K., Ghosh, S. K., Rupainwar, D. C., & Sharma, Y. C. (1993). Managing aqueous solutions rich in Mn(II): An inexpensive technique. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 70(2), 131-137.
- Visa, M., Andronic, L., & Duta, A. (2015). Fly ash-TiO₂ nanocomposite material for multi-pollutants wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 150, 336-343.
- Visa, M., Isac, L., & Duta, A. (2012). Fly ash adsorbents for muti-cation wastewater treatment. *Applied Surface Science*, 258, 6345-6351.

- W, R. E., B, B. R., & D, E. A. (2017). Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington D.C., USA.
- Yadava, K. P., Tyagi, B. S., Panday, K. K., & Singh, V. N. (1987). Fly ash for the treatment of Cd(II) rich effluents. *Environmental Technology Letters*, 8(1-12), 225-234.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review, *Advance in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184.
- Zaharia, C., & Suteu, D. (2013). Coal fly ash as adsorptive material for treatment of a real textile effluent: operating parameters and treatment efficiency, *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2226-2235.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018). กระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2560). มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. สืบค้นเมื่อ 23 มีนาคม 2562, จาก <http://www.diw.go.th/hawk/news/11.PDF>
- กาวิ ศรีกุลกิจ. (2544). การดัดแปรสมบัติการรับสีของผ้าฝ้ายในขั้นตอนการเตรียมผ้า. (รายงานผลการวิจัย). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- กุลธิดา ถาวรกิจการ, & กิจชัย ศิริวัฒน์. (2532). ความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. กระทรวงสาธารณสุข.
- ชนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. (2550ก). ประเภทของสีย้อม. สืบค้นเมื่อ 12 มีนาคม 2562, จาก http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=6&read=true&count=true
- ชนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. (2550ข). สีย้อม. สืบค้นเมื่อ 12 มีนาคม 2562, จาก http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true
- งามชื่น คงเสรี. (2546). ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว. กรมวิชาการเกษตร.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. (2556). การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเก้าอี้เตาผสมหินปูนและปูนซีเมนต์เพื่อใช้งานวิศวกรรมธรณีสิ่งแวดล้อม. (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- دنوپل ตันนโยภาส, วิลาวรรณ ศิลป์สอน, & สุชาติ จันทรมณี. (2555). การเตรียมกระเบื้องมวลเบา

- ด้วยเศษเข้าเซรามิกถุงมือชำระผสมแก้ลอยไม่ย่างพาราและหางแร่ดินขาว. วารสาร มหาวิทยาลัยทักษิณ, 15(3), 250-258.
- ดิเรก ทองอร่าม, วิทยา ตั้งสกุล, นาวิ จิระชีวี, & อธิติสุนทร นันทกิจ. (2545). การออกแบบและเทคโนโลยีการให้น้ำแก่พืช. วารสารเคหการเกษตร.
- ธีระชัย วัฒนสกุลเอก. (2546). การนำแก้ลอยขานอ้อยไปใช้ดูดซับกำจัดโครเมียมแล้วนำไปทำให้เป็นก้อนแข็ง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นพปฎล เสี่ยงมศักดิ์, พิชญา ศรีเสน, & ฝนทิพย์ แนนสนิท. (2562). พฤติกรรมการดูดซับตะกั่วด้วยถ้ำชีวมวล. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 30(2), 25-33.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์, & คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. (2550). หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญชัย ธรรมดิระวุฒิ. (2552). เกร็ดความรู้เรื่องผ้าบาติก. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. .
- บุญรัตน์ กาญจนวรรณิชย์. (2552). การพัฒนาสีย้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- บุรณสิงห์, ณ. (2560). ประโยชน์ของแก้ลอยจากการผลิตกระแสไฟฟ้า: วัสดุทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. (บทความวิชาการ). สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.
- พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์. (2555). การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พรสวรรค์ อังศิริสวัสดิ์. (2559). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือกหอมไม้แห้ง. The National and International Graduate Research Conference 2016, 343–350.
- พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์, & วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์. (2553). การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ Adsorption of dyes by natural adsorption, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 27(4), 61-68.
- พัชรินทร์ ตั้งควิเวชกุล. (2549). การดูดซับเหล็กและแมงกานีสด้วยถ่านที่เตรียมจากไมยราบยักษ์ แกลบดำและไคโดซานจากกระดองปูนา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี, ขนิษฐา แก้วอิน, สุทธะนันท์, ร., & โกวิท พิชยะมงคลา. (2557). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบแบบตรึงในคอลัมน์. The Journal of KMUTNB. 24(2).
- พิเชษฐ์ หนูหมื่น. (2557). การดูดซับสีในน้ำเสียจากกระบวนการทำผ้าบาติกด้วยอิฐมอญอบ. (ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พีรภพ จอมทอง. (2559). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโรงไฟฟ้าชีวมวล. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ. (2547). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโพแทสเซียมและสังกะสี

- โดยใช้แกลบเผา. โครงการงานวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. (2538). วิศวกรรมการประปา เล่ม2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รวินิภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. วารสารวิทยาศาสตร์.
มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 44(3).
- โรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2552). ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ. สืบค้นเมื่อ
27 มีนาคม 2562, จาก
http://www.thaiwasteexchange.net/detail_knowledge.php?kid=3
- ลิลี โกศัยยานนท์. (2541). คู่มือวิชาการสิ่งทอ (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วรรณวิภา ผลหาญ. (2547). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก.
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบา
เป็นตัวดูดซับ. (รายงานฉบับสมบูรณ์). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วรินธร บุญยะโรจน์, & ศิริชัย สาระมนัส. (2561). การพัฒนาคุณสมบัติของต้นแบบแผ่นมวลเบาจากเศษ
ใบยางพาราและเถ้าไม้ยางพาราสำหรับประยุกต์ใช้ระดับภาคสนาม. (รายงานวิจัย).
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วารินทร์ พิมพา, & จักรกฤษณ์ พิมมา. (2557). การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้ตัวดูดซับจากฟางข้าว
สำหรับบำบัดน้ำทิ้ง. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ศิริ ผาสุก. (2535). สมุนไพรให้สี. กรุงเทพฯ: เจริญวิทย์การพิมพ์.
- สกล ศิริรัตน์. (2546). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด
เกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี.



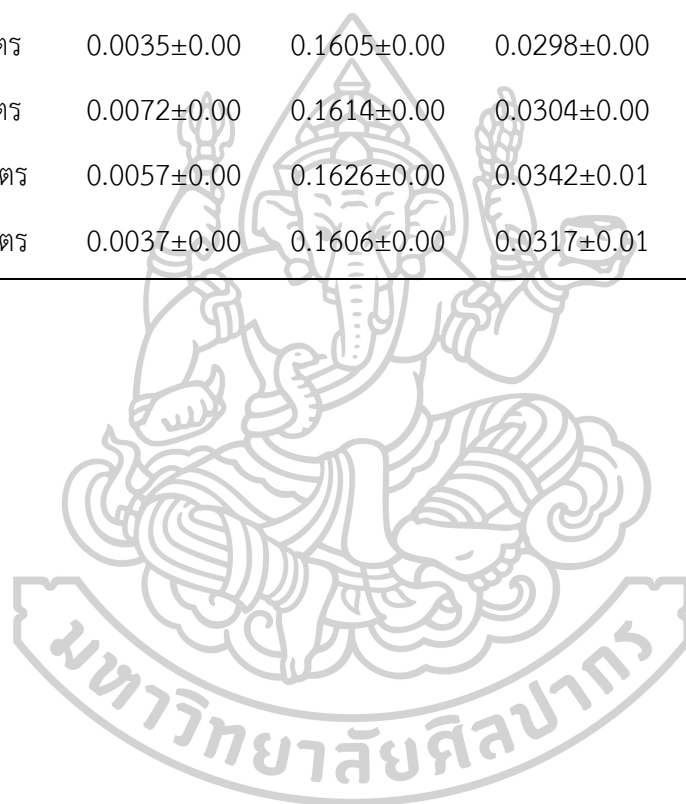
ตารางที่ ก.1 ผลวิเคราะห์การดูดซับของโลหะหนักที่สภาวะต่างๆด้วยถ้ำลอยไม้ยางพาราในน้ำเสียข้อม
สังเคราะห์สีน้ำเงิน

สภาวะที่ทดสอบ	ชนิดของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	Pb	Fe	Mn	Zn
ค่ากรด-ด่าง				
pH 5	0.0025±0.00	0.1639±0.00	0.0308±0.00	0.0191±0.00
pH 6	0.0032±0.00	0.1647±0.00	0.0305±0.00	0.0182±0.00
pH 7	0.0021±0.00	0.1632±0.00	0.0413±0.00	0.0186±0.00
pH 8	0.0028±0.00	0.1620±0.00	0.0340±0.01	0.0187±0.00
ขนาดถ้ำลอย				
75 ไมครอน	0.0021±0.00	0.1633±0.00	0.0355±0.00	0.0193±0.00
150 ไมครอน	0.0020±0.00	0.1614±0.00	0.0304±0.00	ND*
300 ไมครอน	0.0022±0.00	0.1644±0.00	0.0305±0.00	0.0166±0.00
ขนาดรวม	0.0022±0.00	0.1614±0.00	0.0390±0.00	0.0175±0.00
ระยะเวลาสัมผัส				
2 ชั่วโมง	0.0035±0.00	0.1614±0.00	0.0294±0.00	0.0209±0.00
4 ชั่วโมง	0.0025±0.00	0.1625±0.00	0.0342±0.01	0.0263±0.00
8 ชั่วโมง	0.0023±0.00	0.1625±0.00	0.0327±0.01	0.0245±0.01
16 ชั่วโมง	0.0030±0.00	0.1620±0.00	0.0305±0.00	0.0265±0.00
24 ชั่วโมง	0.0029±0.00	0.1611±0.00	0.0331±0.00	0.0384±0.02

*Not Detection

ตารางที่ ก.1 ผลวิเคราะห์การดูดซับของโลหะหนักที่สภาวะต่างๆด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในน้ำเสียอ้อม
สังเคราะห์สีน้ำเงิน (ต่อ)

สภาวะที่ทดสอบ	ชนิดของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	Pb	Fe	Mn	Zn
ปริมาณเถ้าลอย				
5 กรัมต่อลิตร	0.0021±0.00	0.1620±0.00	0.0317±0.01	0.0203±0.00
15 กรัมต่อลิตร	0.0027±0.00	0.1607±0.00	0.0294±0.00	0.0318±0.01
25 กรัมต่อลิตร	0.0035±0.00	0.1605±0.00	0.0298±0.00	0.0377±0.02
50 กรัมต่อลิตร	0.0072±0.00	0.1614±0.00	0.0304±0.00	0.0448±0.01
100 กรัมต่อลิตร	0.0057±0.00	0.1626±0.00	0.0342±0.01	0.0297±0.01
150 กรัมต่อลิตร	0.0037±0.00	0.1606±0.00	0.0317±0.01	0.0254±0.01



ตารางที่ ก.2 ผลวิเคราะห์การดูดซับของโลหะหนักที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยเถ้าลอยแกลบในน้ำเสียข้อม
สังเคราะห์สีน้ำเงิน

สภาวะที่ทดสอบ	ชนิดของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	Pb	Fe	Mn	Zn
ค่ากรด-ด่าง				
pH 5	0.0022±0.00	0.1608±0.02	0.6481±0.02	0.0401±0.03
pH 6	0.0026±0.00	0.1877±0.05	0.3808±0.01	0.0245±0.01
pH 7	0.0030±0.00	0.1759±0.04	0.2845±0.01	0.0264±0.00
pH 8	0.0027±0.00	0.1924±0.00	0.1969±0.01	0.0199±0.01
ระยะเวลาสัมผัส				
2 ชั่วโมง	0.0020±0.00	0.1708±0.03	1.4209±0.02	0.0162±0.00
4 ชั่วโมง	0.0020±0.00	0.1676±0.01	1.4698±0.07	0.0130±0.01
8 ชั่วโมง	0.0022±0.00	0.1678±0.01	1.6419±0.04	0.0227±0.00
16 ชั่วโมง	0.0022±0.00	0.3999±0.05	1.7688±0.06	0.0103±0.00
24 ชั่วโมง	0.0021±0.00	0.1792±0.02	1.7426±0.07	0.0114±0.00
ปริมาณเถ้าลอย				
5 กรัมต่อลิตร	0.0021±0.00	0.1762±0.01	0.2687±0.01	ND*
15 กรัมต่อลิตร	0.0021±0.00	0.2039±0.03	0.3067±0.01	0.0098±0.01
25 กรัมต่อลิตร	0.0022±0.00	0.2491±0.04	0.2707±0.01	0.0021±0.00
50 กรัมต่อลิตร	0.0025±0.00	0.1613±0.02	0.2769±0.02	0.0049±0.00
100 กรัมต่อลิตร	0.0022±0.00	0.1850±0.02	0.1819±0.00	0.0073±0.01
150 กรัมต่อลิตร	0.0022±0.00	0.1618±0.03	0.1755±0.00	0.0272±0.01

*Not Detection

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Kamonrat Kliangpradith
วัน เดือน ปี เกิด	12 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	Ranong
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร อ.เมือง จ.นครปฐม พ.ศ. 2561 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร อ.เมือง จ.นครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	18/10 M.4 Tombon Thongmongkol Amphoe Bangsaphan Changwat Prachuap Khiri Khan 77230
ผลงานตีพิมพ์	กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์, นฤมล ทองมาก และพรทิพย์ ศรีแดง (2564). การดูดซับสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำทิ้งการผลิตผ้าบาติกด้วยเถ้าลอยไม้ ยางพารา. The journal of Industrial Technology.17, 1-14.
รางวัลที่ได้รับ	-

