

การประยุกต์ใช้กากหม้อกรองเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการ
ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซนเพื่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Application of Filter Cake Waste from Sugar Industry via Hydrothermal Carbonization
Process for Industrial Wastewater Treatment



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

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้กากหม้อกรองเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาล ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเพื่อบำบัด น้ำเสียของโรงงาน
โดย	น.ส.รัชมล วิธวัฒนา
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฉัพพรรณรัตน์)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมย์ม)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)	

รัชมล วิรุวัฒน์ : การประยุกต์ใช้กากหม้อกรองเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเพื่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน. (

Application of Filter Cake Waste from Sugar Industry via Hydrothermal Carbonization Process for Industrial Wastewater Treatment) อ.ที่ปรึกษาหลัก :

ผศ. ดร.วรวจน์ กนกกันตพงษ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.บุญฤทธิ์ ปัญญาภิบาล

กากหม้อกรองเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลซึ่งมีจำนวนมาก และมีปริมาณคาร์บอนที่สูง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากหม้อกรอง มาผลิตเป็นวัสดุดูดซับด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผล ได้แก่ อุณหภูมิ (200, 250, 300 °C) ระยะเวลาทำปฏิกิริยา (1, 2, 3 ชั่วโมง) และอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำ (1:5, 1:10, 1:15) โดยผลผลิตที่ได้เรียกว่า ไฮโดรชาร์ และนำไฮโดรชาร์ที่ได้มาทดสอบการดูดซับสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำตาลที่สถานะค่าความเป็นกรด-ด่างจริง (pH = 4.18) และ ± 2 จากค่าความเป็นกรด-ด่างจริง (pH = 6.18, 2.18) ผลการศึกษาพบว่า ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำกลั่น 1:10 สามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่ดี โดยไฮโดรชาร์ดังกล่าวมีค่าผลผลิตที่ได้ร้อยละ 57.73 โดยน้ำหนัก ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 273.37 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าไอโอดีนนัมเบอร์สุทธิเท่ากับ 153.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ในส่วนของการศึกษาการดูดซับ พบว่า เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีของไฮโดรชาร์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 1 นาที) และประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำตาลในสถานะปกติได้ร้อยละ 70.84 นอกจากนี้ได้ทำการทดลองในคอลัมน์จำลอง พบว่าปริมาณน้ำเสียที่ไฮโดรชาร์สามารถดูดซับสีได้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งเท่ากับ 40 มิลลิลิตร ที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีค่าสีเท่ากับ 274 ADMI

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สห ปลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา)

ปีการศึกษา 2564

ปลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6087204820 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Hydrothermal Carbonization, Filter cake, Hydrochar, Iodine number, ADMI, Adsorption

Ratchamol Withuwatthana : Application of Filter Cake Waste from Sugar Industry via Hydrothermal Carbonization Process for Industrial Wastewater Treatment. Advisor: Asst. Prof. Vorapot Kanokkantapong, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Bunyarit Panyapinyopol, Ph.D.

Filter cake is a sugar industry waste which contains high carbon. This study aimed to investigate the absorption application of the filter cake in varied temperatures (200, 250 and 300 °C), reaction times (1, 2 and 3 hour(s)) and filter cake: water ratios (1:5, 1:10 and 1:15) in hydrothermal carbonization process. The carbonaceous solid product of filter cake in the process is named hydrochar. Hydrochar was then tested for color removal of wastewater from sugar industry at condition of as is pH (4.18), as is pH +2 (6.18) and as is pH -2 (2.18). The results found that characteristics of hydrochar from 300°C reaction temperature, 1-hour reaction time, and 1:10 filter cake: water ratio were represented for optimal adsorbent. The hydrochar obtained from this condition presented 57.73 %yield by weight, and the maximum iodine number and net iodine number at 273.37 mg/g and 153.09 mg/g. In adsorption part, the results showed that adsorption equilibrium time occurred very fast (least than 1 minute). The maximum color removal efficiency of wastewater from sugar industry in normal condition was 70.84 percentage. Moreover, color of wastewater was adsorbed by hydrochar in column experiment and result was presented color value of 274 ADMI with 40 mL at flow rate of 0.5 ml/min, which does not exceed the standard.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันตพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาต่าง ๆ และชี้แนะแนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงให้คติคำสอนในการเรียนการทำงานและการดำเนินชีวิตทั่วไป มีความเข้าใจเข้าใจแก่ศิษย์ และเป็นกำลังใจที่ดีให้ตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้แนวทางต่าง ๆ และคำแนะนำที่ดีในการดำเนินวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมอิม กรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ กรรมการ ภายนอกฯ ที่กรุณาให้ความเห็น คำปรึกษา และข้อชี้แนะของงานวิจัย รวมถึงตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ที่สุด

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลวัฒน์ นาคะสรรค์ ที่ได้กรุณาสอนวิธีดำเนินวิจัยและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนทำวิทยานิพนธ์ และความช่วยเหลือต่าง ๆ ของเจ้าหน้าที่ ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ที่คอยสนับสนุนการดำเนินวิจัยอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนอย่างเต็มที่ที่สุด ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและเป็นທີ່ปรึกษาให้สามารถดำเนินวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณโตคยองซู และวง EXO ศิลปินเกาหลีอันเป็นที่รัก ที่คอยเป็นรอยยิ้ม แรงใจให้สู้กับปัญหาต่าง ๆ ขอขอบคุณเสียงไพเราะและเพลงที่ดีที่เป็นพลังให้สดใสและต่อสู้กับอะไรหลาย ๆ อย่างที่เข้ามาในชีวิต

ท้ายที่สุดขอขอบคุณตัวเองที่ไม่ยอมแพ้ อดทนเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ อดทนกับปัญหาอุปสรรคที่เข้ามาและลุกขึ้นต่อสู้จนสามารถผ่านไปได้ด้วยดี และสุดท้ายนี้ขอบคุณวิทยานิพนธ์เล่มนี้ที่ทำให้ได้รู้จักตัวเองมากขึ้น

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โรงงานน้ำตาลของประเทศไทย.....	4
2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย.....	4
2.1.2 ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการน้ำตาล.....	6
2.2 กากหม้อกรอง.....	9
2.2.1 คุณสมบัติของกากหม้อกรอง	9
2.2.2 ประโยชน์ของกากหม้อกรอง	9

2.3	น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล	10
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาล	10
2.3.1	ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม	11
2.3.2	American Dye Manufacturers Institute (ADMI)	11
2.3.3	เทคโนโลยีการกำจัดสี (Color Removal Technology)	11
2.4	กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	12
2.4.1	ไฮโดรเทอร์มอลลิกเวฟแอคชัน (Hydrothermal Liquefaction หรือ HTL)	13
2.4.2	ไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชัน (Hydrothermal gasification หรือ HTG).....	14
2.4.3	ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC).....	15
2.5	กระบวนการการดูดซับ	19
2.5.1	ประเภทของการดูดซับ	19
2.5.2	แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ.....	20
2.5.3	ปัจจัยของที่มีผลต่อการดูดซับ	21
2.5.4	กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)	22
2.5.5	จลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics)	23
2.5.6	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherms).....	25
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.6.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน.....	28
2.6.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีด้วยไฮโดรซาร์.....	29
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1	อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.1.1	อุปกรณ์และเครื่องมือ	36
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.2.1	ศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์	37

3.2.2	กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	37
3.2.3	วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย	40
3.2.4	ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ	40
3.2.5	ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล	41
3.2.6	ศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยการดูดซับสีแบบคอลัมน์จำลอง	43
3.3	การวิเคราะห์ข้อมูล	44
3.4	สรุปการดำเนินงานวิจัย	44
บทที่ 4	ผลการศึกษาและอภิปรายผล	47
4.1	สมบัติของกากหม้อกรอง	47
4.2	สมบัติของไฮโดรซาร์	48
3.2.1	สมบัติทางกายภาพของไฮโดรซาร์	48
3.2.2	ผลผลิตที่ได้ (yields)	50
4.3	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (iodine number)	51
4.4	องค์ประกอบทางเคมีของไฮโดรซาร์	53
3.4.1	ค่าความเป็นกรด-ด่างของไฮโดรซาร์	53
3.4.2	องค์ประกอบโดยประมาณของไฮโดรซาร์ (proximate analysis)	54
3.4.3	องค์ประกอบโดยละเอียดของไฮโดรซาร์ (ultimate analysis)	55
4.5	พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน	56
4.6	โครงสร้างอณูฐานวิทยา	57
4.7	หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์	57
4.8	เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล	58
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล	59
4.10	การดูดซับสีในคอลัมน์จำลอง	62
4.11	สมบัติของน้ำหลังการดูดซับด้วยกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์	63

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	80



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ผลึกภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล.....	8
รูปที่ 2.2 กากหม้อกรอง (filter cake).....	9
รูปที่ 2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวล.....	13
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	14
รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสของน้ำ.....	15
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันของเซลูโลส.....	18
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ.....	23
รูปที่ 2.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	26
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	27
รูปที่ 3.1 แผนผังดำเนินงานวิจัย.....	35
รูปที่ 3.2 ถึงปฏิกรณ์ความดันสูงแบบสแตนเลส.....	38
รูปที่ 3.3 แก้วทรงกระบอก.....	38
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	39
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ.....	41
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล..	42
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดลองแบบคอลัมน์.....	44
รูปที่ 4.1 ไฮโดรซาร์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	50
รูปที่ 4.2 ผลผลิตที่ได้รับย่อยของไฮโดรซาร์.....	51
รูปที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าไอโอดีนนัมเบอร์สุทธิของไฮโดรซาร์.....	53
รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างอสัณฐานวิทยาของ (ก) กากหม้อกรองและ (ข) ไฮโดรซาร์.....	57
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมอินฟราเรดของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์.....	58
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงที่สภาวะความเป็นกรด-ต่างต่าง ๆ ด้วยไฮโดรซาร์ ณ เวลาต่าง ๆ.....	59
รูปที่ 4.7 น้ำเสียของโรงงานน้ำตาล (ก) ก่อน และ (ข) หลังดูดซับ.....	60
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงที่สภาวะความเป็นกรด-ต่างต่าง ๆ ด้วยไฮโดรซาร์..	61
รูปที่ 4.9 โครงสร้างหลักของสารกลุ่มเมลานอยดิน.....	61

รูปที่ 4.10 กลไกที่เป็นไปได้ของการดูดซับสีในน้ำเสียของไฮโดรซาร์.....62

รูปที่ 4.11 ค่าสีของน้ำที่วัดได้หลังจากผ่านคอลัมน์จำลองทุก 10 นาที.....62



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำที่จึ่งจากโรงงานน้ำตาล.....	10
ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	31
ตารางที่ 2.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีด้วยไฮโดรซาร์.....	33
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์.....	37
ตารางที่ 3.2 วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย.....	40
ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ.....	41
ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล..	43
ตารางที่ 3.5 สรุปการดำเนินงานวิจัย.....	45
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีของกากหม้อกรอง.....	47
ตารางที่ 4.2 สหสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์กับตัวแปรที่มีผล.....	51
ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างและองค์ประกอบโดยประมาณของกากหม้อกรองไฮโดรซาร์.....	54
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบโดยละเอียดของไฮโดรซาร์.....	55
ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์.....	56
ตารางที่ 4.6 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลก่อนและหลังการดูดซับ.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่ใหญ่เป็นอันดับ 2 ของโลกรองมาจากประเทศบราซิล ซึ่งในอนาคตคาดการณ์ว่าประเทศไทยจะส่งออกน้ำตาลได้มากกว่าเดิมประมาณ 3.6 ล้านตัน โดยเป็นผลมาจากการเติบโตอย่างต่อเนื่องในการขยายความสามารถในการผลิตและส่งออก เนื่องจากการลงทุนด้านการชลประทาน ขยายพื้นที่ปลูกอ้อยและกำลังการผลิตน้ำตาล (ทิพวรรณ แก้วหนู and หิรัญกุล พลรัตน์ 2560) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปอ้อยมี 3 ส่วน ได้แก่ น้ำอ้อย ชานอ้อย และกากหม้อกรอง โดยน้ำอ้อยจะนำเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาล ชานอ้อยนำไปผลิตไฟฟ้าและบรรจุภัณฑ์อาหาร ส่วนกากหม้อกรองซึ่งเป็นส่วนกากที่ปนไปกับน้ำอ้อยหลังจากผ่านเครื่องหีบแล้วก่อนที่จะส่งน้ำอ้อยผ่านเข้าเครื่องต้ม โดยน้ำอ้อยดังกล่าวจะต้องถูกกรองเอาเศษผงที่ติดมาออกก่อน ซึ่งกากที่ผ่านกรองนี้เรียกว่า กากหม้อกรอง หรือ filter cake (กลุ่มส่งเสริมอุตสาหกรรมชีวภาพ 2561) แต่ละโรงงานผลิตกากหม้อกรองประมาณร้อยละ 3-9 จากกระบวนการผลิตน้ำตาลหรือเท่ากับ 1.5-4.5 ล้านตันต่อปี คิดจากโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยทั้งหมด (Pluemjai, Tungkananuruk et al. 2018) ปกติกากหม้อกรองจะถูกวางกองไว้ในโรงงานเพื่อรอกำจัด โดยมีบางส่วนได้มอบให้แก่เกษตรกรเพื่อนำไปเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมน้ำตาลนั้นมีสีน้ำตาลเข้ม หากระบายสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัดจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ อีกทั้งประเทศไทยได้เพิ่มสีเป็นคุณภาพของน้ำทิ้งตัวใหม่ในมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 โดยกำหนดค่ามาตรฐานไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ (ADMI) ซึ่งการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมมีวิธีที่หลากหลายด้วยกัน เช่น การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton's reaction) ตลอดจนกระบวนการดูดซับ (Metcalf and Eddy 2014) ทั้งนี้กระบวนการดูดซับนั้นเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการดูดติดผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้รับความนิยมน้อยกว่า เนื่องจากมีข้อดีคือ เป็นกระบวนการมีต้นทุนต่ำ ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาผลิตเป็นตัวดูดซับได้ ดังเช่นงานวิจัยของ Li, Guo et al. (2019) ได้นำไม้ไผ่ไปเตรียมเป็นไฮโดรซาร์และนำไปดูดซับสีเมทิลีนบลู ผลการวิจัยพบว่าไฮโดรซาร์ที่เตรียมจากไม้ไผ่สามารถดูดซับสีเมทิลีนบลูได้สูงถึง 1155.77 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากงานวิจัยของ Li, Guo et al. (2019) นั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมที่มีปริมาณคาร์บอนคงที่สูง เช่น ไม้ไผ่ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ กากเมล็ดกาแฟ

และสาหร่าย สามารถนำไปเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อผลิตเชื้อเพลิง น้ำมันชีวภาพ หรือถ่านชีวภาพ โดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (hydrothermal carbonization) ซึ่งเป็นการแปลงสารคาร์บอนด้วยเคมีความร้อน เพื่อลดขนาดและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและสถานะของสารคาร์บอน ซึ่งกลไกของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบแห้ง (Libra, Ro et al. 2011) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เรียกว่า ไฮโดรชาร์ (hydrochar) สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวเก็บพลังงาน วัสดุเพาะเมล็ด ตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนเป็นตัวดูดซับ กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้น สามารถผลิตไฮโดรชาร์ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาตรและขนาดรูพรุนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของตัวดูดซับ (Parshetti, Chowdhury et al. 2014) จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดความต้องการในการผลิตตัวดูดซับด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน โดยนำกากหม้อกรองวัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำตาลมาทำเป็นตัวดูดซับที่มีคุณภาพสูง และนำไปบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล เพื่อเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้และลดค่าใช้จ่าย อีกทั้งกระบวนการดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำกากหม้อกรองซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลเป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับที่มีคุณภาพสูง เพื่อนำไปกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลด้วยกระบวนการดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการใช้กากหม้อกรองเป็นวัสดุตั้งต้นของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันในการผลิตตัวดูดซับ
- 1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล ด้วยกากหม้อกรองที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1 กากหม้อกรองที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน มีคุณสมบัติสามารถเป็นตัวดูดซับ
- 1.3.2 ไฮโดรชาร์มีประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำเสียได้ดีกว่ากากหม้อกรอง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัย ดังต่อไปนี้

1.4.1 งานวิจัยนี้ใช้กากหม้อกรองและน้ำเสีย จากโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งในจังหวัดเพชรบูรณ์

1.4.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกากหม้อกรองก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน ได้แก่ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งจะทำการศึกษาทุกตัวอย่าง รวมทั้งลักษณะพื้นผิว พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน องค์ประกอบโดยประมาณ และองค์ประกอบโดยละเอียด ซึ่งจะทำการศึกษาตัวอย่างที่เป็นตัวแทนจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

1.4.3 ศึกษาอุณหภูมิ ระยะเวลา และอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน เพื่อผลิตเป็นตัวดูดซับ

1.4.4 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่ผลิตจากกากหม้อกรอง ได้แก่ สี (color) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) บีโอดี (Biological Oxygen Demand) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) และปริมาณของแข็งแขวนละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids)

1.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงด้วยตัวดูดซับที่ผลิตจากกากหม้อกรอง

1.4.6 ศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยการดูดซับสีในคอลัมน์จำลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพิ่มมูลค่าให้แก่กากหม้อกรองเหลือทิ้งโดยนำไปผลิตเป็นตัวดูดซับ

1.5.2 เป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการนำผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากอุตสาหกรรมน้ำตาลไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปบำบัดน้ำเสียในโรงงาน

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรงงานน้ำตาลของประเทศไทย

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

ทิพวรรณ แก้วหนู and หิรัญกุล พลรัตน์ (2560) ได้สรุปว่ากระบวนการผลิตน้ำตาลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ แสดงดังขั้นตอนต่อไปนี้

2.1.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลดิบ

ขั้นตอนการเตรียมอ้อยป้อนลูกหีบเป็นจุดสำคัญอันดับแรกของกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย จะต้องดูแลใกล้ชิดเพราะเป็นจุดที่ช่วยสกัดน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากอ้อยได้มากที่สุด โดยการแปรรูปอ้อยให้อยู่ในสภาพที่ชูดลูกหีบสามารถสกัดน้ำอ้อย หรือน้ำตาลจากอ้อยได้อย่างสะดวก รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง สำหรับการผลิตน้ำตาลทรายดิบจะใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ประกอบด้วยขั้นตอนการผลิต 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) การหีบสกัดน้ำอ้อย (mill)

ในขั้นตอนนี้อ้อยมีลักษณะเป็นฝอยหรือเส้นยาวละเอียดพอสมควร การเตรียมอ้อยป้อนชูดลูกหีบจะมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ดี ถ้าอ้อยถูกทำให้แตกได้ประมาณ 80-85 เปอร์เซ็นต์ เครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อยโดยทั่วไป ได้แก่ ชูดลูกหีบล้วน หรือเทคโนโลยีในการสกัดน้ำอ้อยแบบใหม่ เรียกว่า ดิฟฟิวเซอร์ (diffuser)

(2) การเพิ่มอุณหภูมิและทำใส (clarification)

จากการสกัดน้ำอ้อยจะได้น้ำอ้อยที่เรียกว่า น้ำอ้อยรวม แยกเอาผงกากอ้อยออกจากน้ำอ้อยก่อนนำไปเข้ากรรมวิธีทำให้ใส เพื่อป้องกันไม่ให้สีของน้ำอ้อยเข้มข้นผสมกับน้ำปูนขาวเพราะในกากอ้อยมีสารแซคคาเรติน การป้องกันระดับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำอ้อย หลังจากการผสมกับน้ำปูนขาวและผ่านหม้อทำน้ำร้อนก่อนเข้าพักใส่น้ำอ้อยไม่ให้เป็นกรด-ด่างลดลง ซึ่งถ้าระดับความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อยในถังพักใสเปลี่ยนแปลงจากระดับที่กำหนดไว้ จะทำให้ตะกอนสิ่งบริสุทธิ์ที่แยกตัวจากน้ำอ้อยกลับละลายตัวได้อีก

(3) การต้มระเหยน้ำอ้อย (evaporation)

น้ำอ้อยรวมที่ผ่านตะแกรงแยกผงกากอ้อย จะไปผ่านกรรมวิธีแยกสิ่งสกปรกออกมา เทคโนโลยีที่ใช้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายแบบต่าง ๆ กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบจะใช้กรรมวิธีแยกสิ่งไม่บริสุทธิ์ออกด้วยการทำให้ตกตะกอนซึ่งในกรณีนี้จะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์โดยไม่มุ่งหวังการฟอกสีโดยตรง เริ่มด้วยการผ่านน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น เพื่อลดค่าสีที่

เกิดขึ้นจากการสลายตัวของน้ำตาลในน้ำอ้อย น้ำอ้อยอุ่นจะเข้าผสมกับปูนขาว การผสมจะไม่ใช้เวลานานเกิน 3 นาที เพราะถ้านานกว่านี้อาจทำให้เกิดสีได้ หรือเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารอื่นขึ้นมาเพิ่มเติมซึ่งจะทำให้ได้กากน้ำตาลมากขึ้น โดยจะได้น้ำเชื่อมจากหม้ออุ่นลูกสุดท้าย

(4) การเคี้ยว (crystallization)

น้ำเชื่อมที่ได้จากชุดหม้อต้มจะส่งเข้าไปถังพัก ก่อนที่น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกนำเข้าหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (vacuum pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัวที่จุดผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นมา โดยที่ผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี้ยวนี้รวม เรียกว่า แมสคิท (messecuite)

(5) การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifugation)

แมสคิทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่น (centrifugal) การแยกเม็ดน้ำตาลอาศัยการทำงานของหม้อปั่นน้ำตาล ซึ่งมีหลายแบบหลายชนิด โดยทั่วไปหม้อน้ำตาลมักจะทำด้วยเหล็กอ่อนหรือเหล็กกล้าหรือโลหะผสมนิกเกิลหรือเหล็กกล้าไร้สนิม มีรูที่ข้างหม้อเป็นแฉกสำหรับระบายกากน้ำตาลขณะหม้อปั่นทำงาน โดยกากน้ำตาลจะแยกตัวจากแมสคิทด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทั้งเม็ดน้ำตาลที่ค้างบนตะแกรงหม้อปั่นแล้วลอดผ่านแผ่นโครงรองรับตะแกรงซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นตะแกรงกับผนังด้านข้างของตัวหม้อปั่นออกไปปะทะกับถังหม้อปั่นรวมตัวกันไหลออกจากช่องระบายกากน้ำตาลหลังหม้อปั่นการล้างเม็ดน้ำตาลและการล้างเม็ดน้ำตาลทรายออกจากหม้อปั่นแตกต่างกันตามชนิดของน้ำตาลทราย ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะป็นน้ำตาลทรายดิบ

2.1.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาว

การผลิตน้ำตาลทรายขาวนั้นใช้น้ำตาลทรายดิบเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนการผลิต 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) การละลายและกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (dissolving)

การปั่นละลาย (affinated centrifugation) นำน้ำตาลทรายดิบมาผสมกับน้ำร้อน หรือน้ำเหลือจากการปั่นละลาย (green molasses) น้ำตาลทรายดิบที่ผสมนี้เรียกว่า แมกมา (magma) และแมกมานี้จะถูกนำไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบน้ำเหลืองหรือกากน้ำตาลออก และการทำความสะอาดและฟอกสี (clarification) น้ำเชื่อมที่ได้จากหม้อปั่นละลาย (affinated syrup) จะถูกนำไปละลายอีกครั้งเพื่อละลายผลึกน้ำตาลบางส่วนที่ยังละลายไม่หมดจากการปั่น และผ่านตะแกรงกรองเข้าผสมกับปูนขาว เข้าฟอกสีโดยผ่านเข้าไปในหม้อฟอก ปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวฟอก จากนั้นจะผ่านเข้าสู่การกรองโดยหม้อกรองแบบใช้แรงดัน (pressure filter) เพื่อแยกตะกอนออก และน้ำเชื่อมที่ได้จะผ่านไปฟอกเป็นครั้งสุดท้ายโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) จะได้น้ำเชื่อมรีไฟน์ (refine liquor)

(2) การเคี้ยวตกผลึก (crystallization)

น้ำเชื่อมรีไฟน์ที่ได้จะถูกนำเข้ามาห่อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (vacuum pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว

(3) การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifugating)

แมสคิทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่น (centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็นน้ำตาลรีไฟน์และน้ำตาลทรายขาว

(4) การอบ (drying)

ผลึกน้ำตาลรีไฟน์และน้ำตาลทรายขาวที่ได้จากการปั่นก็จะเข้าหม้ออบ (dryer) เพื่อไล่ความชื้นออก

(5) การบรรจุและรูปแบบสินค้า (packaging)

2.1.2 ผลิตรักษาพลอยได้จากกระบวนการน้ำตาล

จากกระบวนการผลิตน้ำตาลที่มีอ้อยเป็นวัตถุดิบหลักนั้น ส่งผลให้เกิดผลิตรักษาพลอยได้ออกมาจากกระบวนการดังกล่าว ซึ่งบางส่วนได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียเหล่านั้นและมีบางส่วนที่ไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าเท่าที่ควร แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1

2.1.2.1 ชานอ้อย

ชานอ้อย คือ เศษเหลือของลำต้นอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากท่อนอ้อยแล้ว ประโยชน์ที่ได้จากชานอ้อย ได้แก่

(1) การผลิตไฟฟ้า

ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหีบอ้อยซึ่งมีปริมาณน้ำตาลติดอยู่น้อยมากส่วนใหญ่จะเหลือเป็นเส้นใยอ้อย (fiber) กับน้ำที่อยู่ในรูปของความชื้นและของแข็งที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย มีความชื้นร้อยละ 48-53 มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำประมาณ 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีคุณสมบัติดีดีไฟง่าย ประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน มีค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (low heating value) ที่ 7.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเตาหม้อน้ำ (boiler) ใช้ผลิตไอน้ำที่ความดันน้ำอยู่ระหว่าง 30 บาร์ต่ออุณหภูมิเฉลี่ย 380 องศาเซลเซียส และที่ความดันน้ำอยู่ระหว่าง 80 บาร์ต่ออุณหภูมิเฉลี่ย 520 องศาเซลเซียส สำหรับเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในกระบวนการผลิตน้ำตาลโดยไอน้ำที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และ

นอกจากนี้ไอน้ำที่ผลิตได้สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงานด้วยการนำไปขับเคลื่อนไอน้ำ (turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(2) บรรจุภัณฑ์อาหาร

บรรจุภัณฑ์อาหารที่ทำจากเยื่อกระดาษชานอ้อยเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลผลิตจากเทคโนโลยีชีวภาพที่นำวัสดุเหลือใช้อย่างชานอ้อยที่เหลือจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลมาใช้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตน้ำตาลจึงทำให้มีชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมาก จึงสามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่อาหารทดแทนการใช้กล่องโฟมที่สร้างปัญหากับสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการนำเยื่อกระดาษชานอ้อยไปผสมตีผ่านกระบวนการป้องกันน้ำรั่วซึมและขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น จาน ชาม ถาด ถ้วยน้ำ และกล่องพร้อมฝาปิด เป็นต้น

(3) ปาร์ติเคิลบอร์ด

การผลิตปาร์ติเคิลบอร์ดส่วนใหญ่มักเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานภายในอาคารมากกว่าใช้งานภายนอกอาคาร โดยเฉพาะการใช้งานในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และงานตกแต่งภายใน ซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนไม้หรือแผ่นขึ้นไม้อัด เพราะสามารถใช้วัตถุดิบจากไม้หรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ให้ขึ้นไม้หรือเส้นใยในการผลิต เช่น ชานอ้อยโดยผสมกับสารยึดติด สารเคลือบผิวกันชื้น และสารเติมแต่งอื่น ๆ ผ่านกระบวนการอัดร้อนและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล เพื่อให้ตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ที่กำหนดไว้

(4) ซิลิกา

ซิลิกาเป็นผลึกของแข็งสีขาวที่ไม่ละลายน้ำเกิดจากสารประกอบทางเคมีระหว่างธาตุซิลิกอนกับธาตุออกซิเจนมีสูตรทางเคมี คือ SiO_2 มีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยซิลิกาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากสิ่งมีชีวิต เช่น ซิลิกาที่มีในสาหร่ายเปลือกแข็งหรือไดอะตอม มีขนาดอนุภาคเล็ก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถูกนำมาใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ชานอ้อยพบว่าปริมาณซิลิกาสูงมากกว่าร้อยละ 90 เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์ วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ และซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกันไปตามแต่คุณสมบัติ ซึ่งปัจจุบันซิลิกามีบทบาทสำคัญทั้งในอุตสาหกรรมและการศึกษาวิจัยรวมถึงมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายแขนง เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมสี เป็นต้น

(5) ถ่านชีวภาพ (biochar)

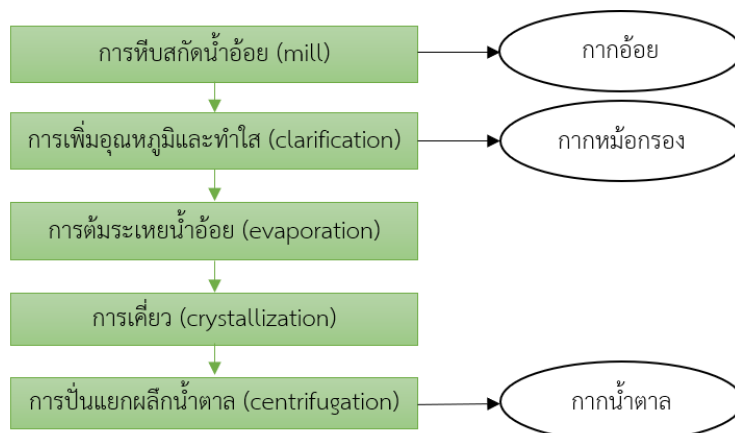
ถ่านชีวภาพสามารถผลิตได้โดยใช้เคมีเชิงความร้อนจากวัตถุดิบประเภทอินทรีย์ ซึ่งชานอ้อยเป็นอีกหนึ่งวัตถุดิบที่ดีเนื่องจากมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง โดยในระหว่างที่มีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดและที่ความร้อนสูง (300-700 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแยกสลายและระเหยออก ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเกิดรูพรุน โดยทั่วไปสามารถนำมาใช้เพิ่มความสมบูรณ์ให้กับดิน ซึ่งแตกต่างจากถ่านทั่วไปซึ่งเดิมผลิตจากถ่านหินและใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยถ่านชีวภาพได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) โดยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีเพื่อสร้างให้เกิดรูพรุนและนำไปใช้สำหรับงานดูดซับ

2.1.2.2 กากหม้อกรอง

กากหม้อกรอง คือ ส่วนที่เป็นกากปนไปกับน้ำอ้อยหลังจากผ่านเครื่องหีบแล้ว ก่อนที่จะส่งน้ำอ้อยผ่านเข้าเครื่องต้มเพื่อให้ได้น้ำอ้อยเข้มข้นที่จะทำเป็นน้ำตาลทรายต่อไป โดยน้ำอ้อยดังกล่าวจะต้องถูกกรองเอาเศษผงที่ติดมาออกก่อนซึ่งกากที่ผ่านการกรองที่ค่อนข้างละเอียดนั้นก็คือกากหม้อกรอง

2.1.2.3 กากน้ำตาล

กากน้ำตาล คือ ส่วนที่เป็นของเหลวที่มีลักษณะเหนียวข้น สีดำอมน้ำตาล ซึ่งเป็นผลผลิตอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายโดยมีอ้อยเป็นวัตถุดิบ กากน้ำตาลนี้จะแยกออกจากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายในขั้นตอนสุดท้าย ด้วยการแยกออกจากเกล็ดน้ำตาลโดยวิธีการปั่น (centrifuge) ซึ่งไม่สามารถตกผลึกเป็นเกล็ดน้ำตาลได้ด้วยวิธีทั่วไป และไม่นำกลับมาใช้ผลิตน้ำตาลทรายอีก



รูปที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล

2.2 กากหม้อกรอง

2.2.1 คุณสมบัติของกากหม้อกรอง

กรกิจ ทันสมัย (2554) ได้กล่าวว่า ในกระบวนการผลิตน้ำตาล สิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำอ้อยเมื่อผ่านความร้อนผสมด้วยปูนขาวและฟอกขาวด้วย SO_2 หรือ CO_2 หลังจากพักใสแล้วจะถูกแยกออกโดยการกรองเกิดการรวมตัวเป็นก้อน เรียกว่า กากหม้อกรองหรือกากตะกอน ซึ่งกากหม้อกรองเหล่านี้มีความชื้นที่แตกต่างกัน การกรองในโรงงานทั่วไปจะใช้เครื่อง rotary vacuum filler โดยใช้ผงละเอียดของกากอ้อยเป็นตัวช่วยกรอง (filter aids) กากตะกอนที่ได้จากเครื่องจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนักปริมาณและองค์ประกอบกากตะกอนขึ้นอยู่กับสถานที่ปลูก พันธุ์อ้อย ประสิทธิภาพการกรอง และวิธีในการทำใส

โดยสรุป กากหม้อกรอง คือ สิ่งเจือปนที่เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำอยู่ในน้ำอ้อย สิ่งเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกไปจากน้ำอ้อยในกระบวนการทำใส (clarification) กากหม้อกรองโดยทั่วไปมีลักษณะปนเป็นชิ้นเล็ก ๆ สีเทาเข้ม ส่วนประกอบของกากหม้อกรองไม่ค่อยแน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพและความสะอาดของอ้อยตลอดจนกรรมวิธีการผลิตของโรงงานนั้นด้วย ในส่วนที่เป็นของแข็งเป็นพวกสารอินทรีย์ที่ได้จากอ้อยและดิน รวมทั้งมีไขปนอยู่ด้วย นอกจากนี้ก็มีน้ำตาลละลายอยู่บ้าง ลักษณะของกากหม้อกรองแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กากหม้อกรอง (filter cake)

2.2.2 ประโยชน์ของกากหม้อกรอง

กากหม้อกรองถูกนำมาใช้ทำปุ๋ย โดยปุ๋ยดังกล่าวประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุและแร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 29.6 ไนโตรเจน ร้อยละ 1.4 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 1.2 โพแทสเซียม ร้อยละ 0.2 แคลเซียม ร้อยละ 2.7 แมกนีเซียม ร้อยละ 1.1 ซัลเฟอร์ ร้อยละ 0.2 และค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.2 และสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 12

ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมทางการเกษตรสามารถนำมาใช้ทดแทนแร่ธาตุที่พืชต้องการในบางส่วนได้ และยังพบว่ามีกรนำมาปรับใช้กับแปลงเพาะปลูกอ้อย เนื่องจากว่าฟอสเฟตและไนโตรเจนจะทำให้อ้อยเจริญเติบโตได้ดี และมีปริมาณโปรตีนซึ่งเป็นแหล่งที่ดีในการให้ humic substance แก้อ้อย นอกจากนี้แล้วพบว่าสามารถเก็บความชื้นและปรับสภาพดินได้ดีอีกด้วย (กรกิจ ทัศนสมัย 2554)

2.3 น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลสามารถสรุปสมบัติทางเคมีและกายภาพแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาล

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ผู้วิจัย (ปี)	Parande, Sivashanmugam et al. (2009)	Ozkan, Erguder et al. (2010)	Sahu (2016)
color		-	-	Dark brown
pH		6.7	6.8	5.5
alkalinity (mg/l)		882	1,760	-
TKN (mg/L)		-	70	-
phosphate (mg/l)		-	-	5.9
protein (mg/l)		-	-	43
chlorides (mg/l)		522	-	50
sulphate (mg/l)		271	-	-
hardness (mg/l)		-	-	900
total solid (mg/l)		-	6,062 ± 53.0	1,287
dissolved solids (mg/l)		2,432	-	947
suspended solids (mg/l)		447	665 ± 21.2	340
BOD (mg/L)		2,987	-	-
COD (mg/L)		6,820	6165 ± 517.1	3682

จากการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยข้างต้น พบว่าดัชนีคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงานน้ำตาลมีสีน้ำตาลเข้มมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.5-6.82 โดยเฉพาะค่าซีไอโอดีมี

ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3,682-6,820 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดีมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.438-0.811

2.3.1 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม

สีในแหล่งน้ำเป็นออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.2.1.1 สีที่แท้จริง (true color)

สีจริงที่แท้จริง เป็นสีที่เกิดจากสารต่าง ๆ ในน้ำ และละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ โดยสารที่มีผลต่อการเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยากประเภทกรดฮิวมิกและฟัลวิก ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิตและผลผลิตจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตซึ่งมีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ ดังนั้นการกำจัดสีที่แท้จริงกำจัดได้ยาก

2.2.1.2 สีปรากฏ (apparent color)

สีปรากฏ เป็นสีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนดินตะกอนทราย โดยสามารถกำจัดออกได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง หรือการตกตะกอน

2.3.2 American Dye Manufacturers Institute (ADMI)

ADMI เป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดสีเพื่อตรวจสอบเม็ดสี (Pigment) ในน้ำ ซึ่งย่อมาจาก American Dye Manufacturers Institute การวัดค่าสีในหน่วย ADMI เป็นการวัดปริมาณสีที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างในรูปแบบสีจริงซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบที่ปนเปื้อนในน้ำ แล เป็นตรวจวัดปริมาณของสี (Color Value) ในทุกหน่วยสี ไม่นับที่สีใดสีหนึ่ง

การวัดค่าสี ADMI มีการพัฒนามาจากหลักการวัดค่าสีแบบ tristimulus filter method โดยจะมีการวัดค่าแสงส่องผ่าน (Transmittance) หรือค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) มาคำนวณโดยใช้สมการของ Adam-Nickerson chromatic value formula และการวัดค่าสีในหน่วย ADMI ใน Standard Method for Examination of Water & Wastewater มี 2 วิธีมาตรฐาน ได้แก่

2.3.2.1 APHA 2120E ADMI Tristimulus Filter method

2.3.2.2 APHA 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometer

โดยทั้ง 2 วิธีมาตรฐานดังกล่าว เป็นการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-700 nm ซึ่งเป็นการวัดค่าสีที่แท้จริง โดยวัดปริมาณเม็ดสีตั้งแต่เฉดสีม่วงถึงเฉดสีแดง

2.3.3 เทคโนโลยีการกำจัดสี (Color Removal Technology)

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.3.3.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ

(1) การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(2) การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี ได้แก่ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration)

2.3.3.2 เทคโนโลยีทางเคมี

(1) การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการกำจัดสีแท้และสีปรากฏในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง สารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือสารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) โดยถ้าโมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้ แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์

(2) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดซ์สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนซ์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารเคมีเฟนตัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

2.3.3.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ

(1) การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption)

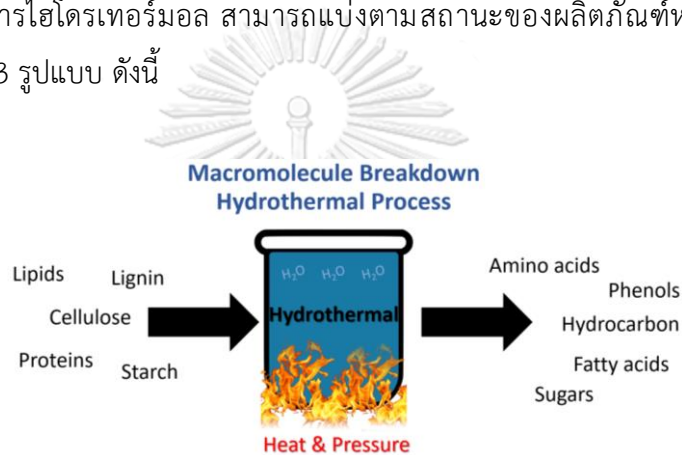
(2) การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

(3) การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process หรือ HT) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงชีวมวลด้วยเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Conversion หรือ TCC) เพื่อลดขนาดและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีของชีวมวล ทั้งที่เป็นชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ เช่น เศษไม้ แกลบ ชังข้าวโพด และเปลือกถั่วลิสง และชีวมวลที่มีความชื้นสูง เช่น มูลสัตว์ ผักตบชวา และ

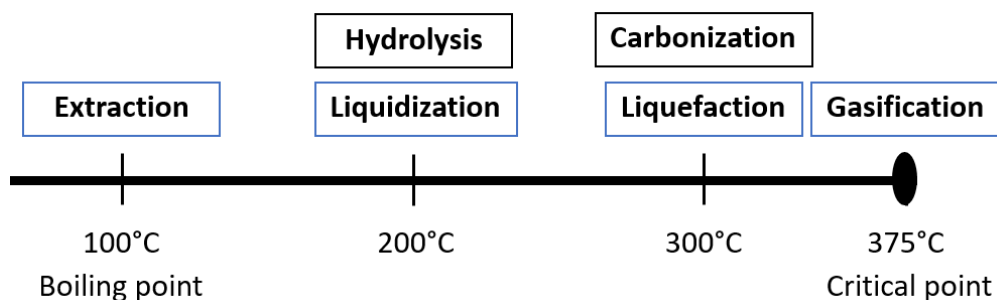
สำหรับน้ำมัน ให้อยู่ในรูปของถ่านชีวภาพหรือน้ำมันชีวภาพ โดยกระบวนการเหล่านี้จะมีการใช้น้ำ ณ สภาวะไต้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส และความดัน 1.5 ถึง 20 เมกกะปาสคาล เป็นสื่อกลางในการนำความร้อน และในบางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เพื่อลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาให้สั้นลงหรือเพื่อเพิ่มผลผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทั้งนี้ลักษณะของ กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ที่เกิดจากการทับถมของซากพืช ซากสัตว์ ภายใต้ อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาหลายล้านปี แต่ในทางกลับกันกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะใช้ ระยะเวลาที่สั้นกว่าการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สามารถแบ่งตามสถานะของผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทำ ปฏิกิริยาออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้



รูปที่ 2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวล
(Department of Agricultural and Biological Engineering 2013)

2.4.1 ไฮโดรเทอร์มอลลิคเอกแฟรกชัน (Hydrothermal Liquefaction หรือ HTL)

เป็นกระบวนการที่อาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 4 ถึง 20 เมกกะปาสคาล ซึ่งบางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการย่อยสลายพันธะเคมีของชีวมวลที่มีน้ำมันและความชื้นสูง เช่น สาหร่าย ผักตบชวา เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ให้เป็นของเหลว นอกจากนี้แล้วปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายชนิดเมื่อมีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันซึ่งแสดงดังรูป 2.4 โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายรูปแบบซึ่งมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน แต่จะแตกต่างกันที่ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการะบวนการจะเป็นของเหลวที่เรียกว่า “เชื้อเพลิงเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ”



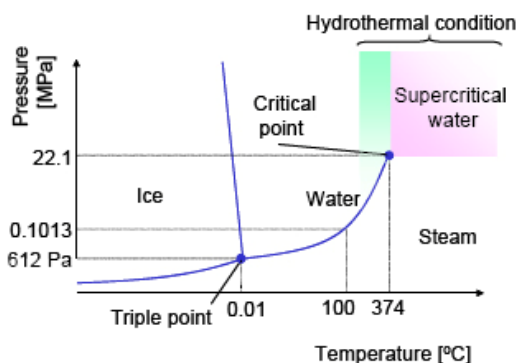
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Yokoyama and Yukihiro 2008)

2.4.2 ไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชัน (Hydrothermal gasification หรือ HTG)

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชันเหมาะสำหรับการทำปฏิกริยาของสารชีวมวลเปียก เมื่อสารชีวมวลเปียกถูกทำให้เป็นก๊าซ โดยปกติแล้วแก๊สซิฟิเคชันทางความร้อนและเคมีจะไม่ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีความชื้นสะสมสูง แต่ในทางกลับกันไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชันได้ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกริยา ดังนั้นสารชีวมวลเปียกสามารถใช้ทำปฏิกริยาได้ โดยที่ราคาไม่แพงและไม่ต้องใช้พลังงานในการอบแห้งในส่วนของการเตรียม

ไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชันเป็นการทำปฏิกริยาของสารชีวมวลในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสและสูงกว่า 20 เมกกะปาสคาลหรือบางครั้งมีการเพิ่มตัวเร่งปฏิกริยาจำพวกอัลคาไลด์ โลหะ และคาร์บอน กระบวนการดังกล่าวช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกริยาเพื่อให้ได้ก๊าซเผาไหม้ได้ดังรูป 2.5 ซึ่งเส้นสมมูลก๊าซและของเหลวเริ่มจากจุดที่อยู่ในทั้งสามเฟสและสิ้นสุดที่จุดวิกฤต และเงื่อนไขของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นอยู่ในบริเวณใกล้จุดวิกฤต เมื่ออุณหภูมิและความดันสูงมากกว่าอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤต สถานะดังกล่าวเรียกว่า น้ำสภาวะยิ่งยวด (supercritical water) และแก๊สซิฟิเคชันในน้ำสภาวะยิ่งยวดนั้นเรียกว่า ซูเปอร์คริติคัลวอเตอร์แก๊สซิฟิเคชัน (supercritical water gasification) น้ำที่มีความร้อนและความดันสูงนั้นจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกริยาสูง เมื่อสารชีวมวลอยู่ในน้ำจะถูกทำให้เป็นก๊าซโดยปฏิกริยาไฮโดรไลซิสและไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์จากไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชันคือ ก๊าซทาร์ โดยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน เนื่องจากปฏิกริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (water gas shift reaction) ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีน้อยมาก และที่อุณหภูมิสูง ความดันต่ำ วัสดุตั้งต้นที่มีความเข้มข้นเจือจางจะทำให้เกิดไฮโดรเจนในปริมาณมาก ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของก๊าซผลิตภัณฑ์นั้นขึ้นกับเงื่อนไขของปฏิกริยา และโดยปกติมีค่าตั้งแต่ 12 ถึง 18 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรนิวตัน



รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสของน้ำ

(Department of Agricultural and Biological Engineering 2013)

2.4.3 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC)

เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน (thermo-chemical process) ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาหลายรูปแบบ ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ดีไฮเดรชัน (dehydration) ดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) พอลิเมอไรเซชัน (polymerization) และ อะโรมาไทเซชัน (aromatization) ที่อาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 1 ถึง 12 ชั่วโมง เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อนให้แก่ชีวมวล เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและสถานะของชีวมวล ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ให้อยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการคือ “ไฮโดรชาร์ (hydrochar)” ถ่านไฮโดรที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ ทั้งในเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเคมี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวเก็บพลังงาน ปรับปรุงคุณภาพดิน ตัวดูดซับ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

ผลผลิตที่สำคัญกระบวนการจะประกอบไปด้วยส่วนของของแข็งคือ ถ่านชีวภาพ และส่วนของของเหลวคือ เชื้อเพลิงเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ ซึ่งในแต่ละกระบวนการอาจจะใช้อุณหภูมิ ความดัน ตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์วัตถุดิบตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

2.4.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

(1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งการกระจายตัวของชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Yao และคณะ (2007) พบว่าอุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะส่งผลต่อกลไกของการเปลี่ยนแปลงฟรุกโทส (fructose) เป็นอย่างมาก ที่อุณหภูมิ 120 ถึง 140 องศาเซลเซียสฟรุกโทสจะ

ถูกเปลี่ยนเป็น 5-hydroxymethylfurfural (HFM) โดยมีการคายน้ำภายในโมเลกุล Gao, Zhou et al. (2016) ได้รายงานไว้ว่า ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากว่ามีการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสไปเป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อนุภาคพื้นผิวของ microcrystalline cellulose ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เซลลูโลสเกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของโมเลกุลจะส่งผลต่อของเหลวและก๊าซโมเลกุลต่ำ แสดงว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลของเซลลูโลส ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์จากการควบแน่นของก๊าซ โดยที่ก๊าซจะไม่สามารถควบแน่น (Incondensable gas) ได้ที่โมเลกุลต่ำ และการให้ความร้อนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดถ่านไฮโดรและของเหลวที่ได้จะมีปริมาณลดลง อุณหภูมิของการดำเนินปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ถ้าอุณหภูมิที่ 350 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันมักจะใช้อุณหภูมิในช่วง 180 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยมีชีวมวลเป็นวัตถุดิบหลัก และเพื่อต้องการให้ได้ไฮโดรคาร์บอนที่มีมูลค่า

(2) เวลา

เวลาเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน Gan and Yuan (2013) ได้ดำเนินกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันของเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาทีถึง 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบเซลลูโลสในผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในน้ำที่เวลา 5 นาที และ 10 นาทีถึง 2 ชั่วโมง ผลผลิตของของแข็งที่เหลือไม่มีอิทธิพลต่อการเกิดไฮโดรคาร์บอนได้จากผลที่ได้จากเทคนิค scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscopy (TEM), fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) และ x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ไฮโดรคาร์บอนมีโครงสร้าง core-shell ที่มีหมู่คาร์บอนซิลิก คาร์บอนิล คีโตน และหมู่อื่น ๆ ไฮโดรคาร์บอนที่ดำเนินการที่เวลานานสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุคาร์บอน Lu และคณะ (2013) ได้ดำเนินกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันของเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ระยะเวลาสั้นกว่า 96 ชั่วโมงภายในเตาอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าองค์ประกอบของของเหลวมีการเปลี่ยนแปลง และเกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสในช่วงเวลา 30 นาทีถึง 4 ชั่วโมง และท้ายที่สุดทำให้เกิดการก่อตัวของกรดอินทรีย์ ดังนั้นเวลาที่มากกว่า 4 ชั่วโมงจะทำให้คุณสมบัติทางเคมีของถ่านไฮโดรมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเมื่อใช้ thermogravimetric analysis (TGA) แสดงให้เห็นว่าถ่านไฮโดรที่ผลิตในเวลามากกว่า 4 ชั่วโมง มีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับการไพโรไลซิส ด้วยเหตุผลนี้เวลาของการปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาคือ 1 ถึง 3 ชั่วโมง

(3) อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ (biomass to water content)

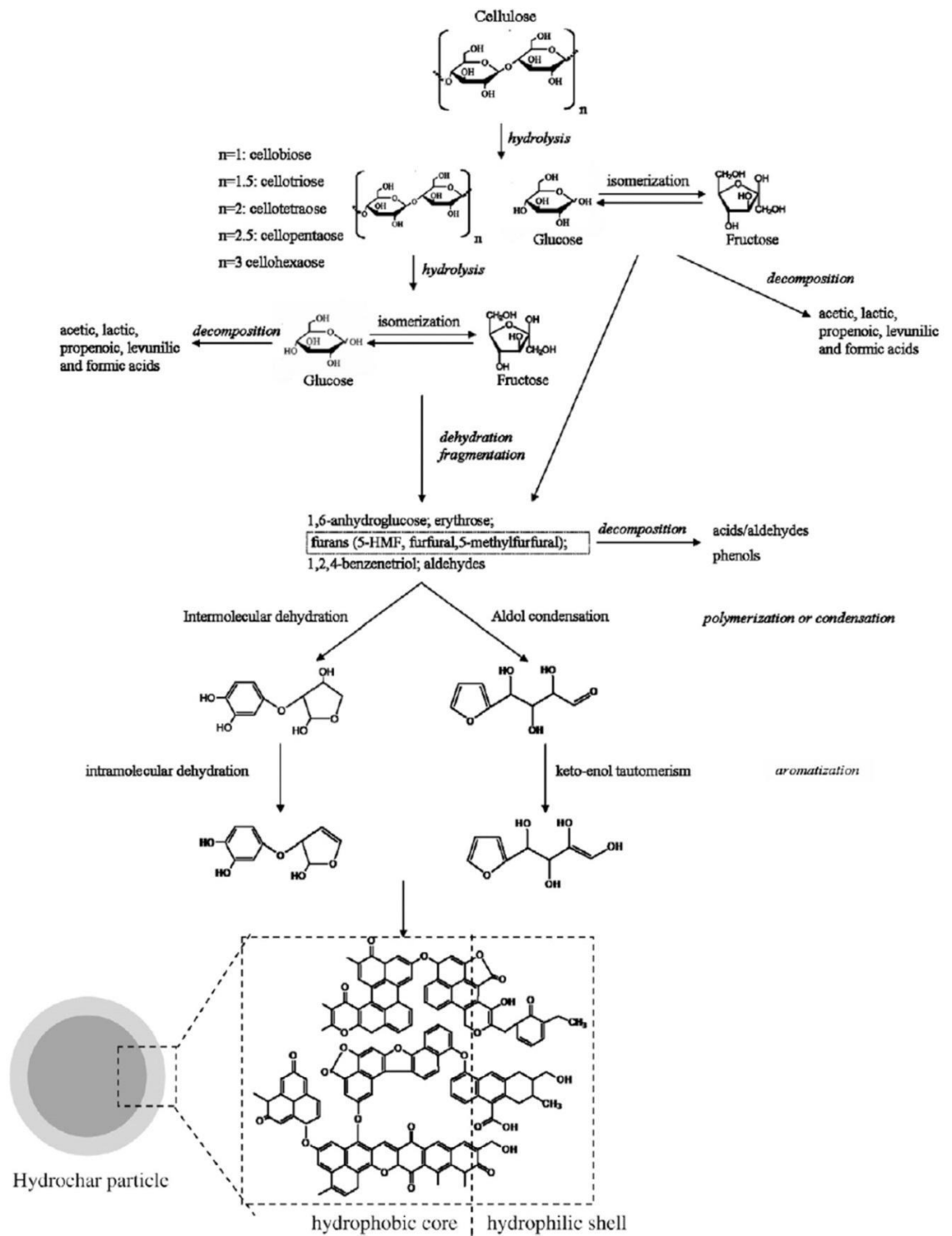
ปริมาณอัตราส่วนของชีวมวลและน้ำเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่ง ปริมาณน้ำที่สูงจะเหมาะสมสำหรับการผลิตของเหลวและก๊าซ อัตราส่วนของน้ำที่สูงต่อมวลจะทำให้ลดปริมาณของไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากว่าชีวมวลจะเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น (Wang, Pan et al. 2008) อัตราส่วนที่มีมวลของชีวมวลสูงต่อน้ำ ทำให้ก๊าซมีปริมาณลดลง เนื่องจากว่าปฏิกิริยาของโมเลกุลชีวมวลและน้ำจะมีประสิทธิภาพน้อยลง ซึ่งลดการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวล การศึกษาส่วนใหญ่จึงนิยมใช้อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำที่ 1:10 ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงของปฏิกิริยาของชีวมวลต่อน้ำจะใช้ที่อัตราส่วน 1:5 ถึง 1:15

(4) ความดัน (pressure)

การเพิ่มอุณหภูมิหรือการเติมของเหลว ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเพิ่มตามเป็นปกติ ปฏิกิริยาความดันจะมีอิทธิพลต่อเครือข่ายปฏิกิริยาตามหลักการของ LeChatelier ปฏิกิริยาที่จุดสมดุลจะมีการเลื่อนเฟสของแข็งและเฟสของเหลวเมื่อเพิ่มปฏิกิริยาและความดัน พร้อมกับสารตั้งต้นที่ลดจำนวนโมเลกุลจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอซิเลชัน การสกัดของชีวมวลจะใช้ความดันที่สูงในการทำปฏิกิริยา มีข้อสันนิษฐานว่าการห่อหุ้มด้วยก๊าซ (encapsulated gases) จะถูกอัดและละลายได้ง่ายในน้ำซึ่งจะช่วยให้เข้าถึงเฟสของเหลวได้กว้างขึ้น

(5) การป้อนความเป็นกรด-ด่างเข้าสู่ระบบน้ำ (feedwater pH)

จากการศึกษาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะสังเกตได้ว่าการทำปฏิกิริยาจะมีการลดลงของความเป็นกรด-ด่าง และมีข้อแนะนำว่าการลดลงของกรดอินทรีย์จะได้ผลิตภัณฑ์ดังเช่น อะซิติก พอร์มิก แลกติก และเลวูเลนิก และมีค่าเป็นกลางถึงค่าเป็นกรดอ่อนในสภาพแวดล้อม จากความแตกต่างของกรดและด่างนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองและมีผลกระทบที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ จากงานวิจัยของ Reza, Rottler et al. (2015) ได้รายงานไว้ว่า ผลผลิตไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากฟางข้าวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.9 เป็น 54.1 เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่เข้าสู่ระบบจาก 2 เป็น 12.2



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันของเซลลูโลส

(Hwang, Aoyama et al. 2012)

2.5 กระบวนการการดูดซับ

กระบวนการการดูดซับ (adsorption process) เป็นการสะสมของสาร ณ บริเวณผิวสัมผัสร่วม (interface) ระหว่างของแข็งและแก๊ส หรือของแข็งและของเหลว โดยมีการแพร่ของสารในก๊าซหรือของเหลว (bulk transfer) มายังผิวของของแข็ง โดยเรียกสารที่สะสมบนผิวของแข็งว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) และเรียกตัวของแข็งว่า สารดูดซับ (adsorbent) โดยในกระบวนการบำบัดน้ำ ใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดสารเจือปนออกจากน้ำด้วยการดูดซับสารไว้บนตัวดูดซับ โดยที่เลือกใช้ตัวดูดซับให้เหมาะสมกับชนิดของสารเจือปนในน้ำ การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับและในโพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งแรงกระทำหรืออันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลหรือไอออนของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของสารถูกดูดซับและตัวดูดซับที่เลือกใช้ โดยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลหรือไอออนของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แรงทางกายภาพและแรงทางเคมี

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

หลักสำคัญในการบอกชนิดของการดูดซับจะต้องพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงที่ยึดเหนี่ยวกันนั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ถ้าการดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวที่ทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับ จะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) ดังนั้นการดูดซับได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับนี้จะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน สารที่ถูกดูดซับนั้นสามารถเกาะอยู่บนรอบ ๆ ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) คือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารดูดซับจะดูดซับติดกับชั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งการที่สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายนี้เป็นข้อดี คือทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้ง่าย

2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิมจะมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น มีพันธะเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง การกำจัดตัวถูกดูดซับ

ออกจากผิวดูดซับทำได้ยาก กล่าวคือจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) การดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)

2.5.2 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

แรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ แรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี โดยแรงทางกายภาพ นั้นได้แก่ แรงแวนเดอวาลส์ และแรงไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งเกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ ส่วนแรงทางเคมีนั้นเกิดจากอันตรกิริยา (interaction) รวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวด้านใน ทำให้เกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) พันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

2.5.2.1 แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waal's force)

เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่อย่างอิสระที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้ว ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณ ภายของอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น เกิดการดึงดูดกันระหว่างตัวกลางดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2.5.2.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force)

เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีลักษณะเหมือนกัน เช่น ระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเหมือนกันหรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยการเกาะจับของโมเลกุลด้วยแรงทางไฟฟ้าสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

(1) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม กล่าวคือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง

(2) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (dispersion effect) เนื่องจากโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้นสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้โดยเมื่อมีอีกโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาใกล้ก็จะเกิดแรงดึงดูด แต่มักเกิดเป็นแรงที่ไม่แข็งแรง

(3) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้นเกิดจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) จากโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่อยู่ใกล้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

2.5.2.3 แรงทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยแรงที่เกิดขึ้นเป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวกลางดูดซับ โดยมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือให้อิเล็กตรอนเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์ และไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (irreversible) เนื่องจากมีการจัดเรียงอะตอมกลายเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา

2.5.3 ปัจจัยของที่มีผลต่อการดูดซับ

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ลักษณะของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

2.5.3.1 ลักษณะของตัวดูดซับ

(1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ กล่าวคือ เมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับแค่เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วยเช่นกัน

(2) ขนาดของตัวดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ ถ้าขนาดของตัวดูดซับมีขนาดเล็กจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับที่เร็วกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับก็มีผลเช่นกัน คือ ถ้าขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงด้วย

(3) เคมีที่ผิวหน้า

หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับ มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่ถ้าหากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

2.5.3.2 ลักษณะของตัวถูกดูดซับ

(1) ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวสารถูกดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือ น้ำ โดยสารถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นการยากในการดูดซับ ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิวยังมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิว ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวละลาย

(2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้น การดูดซับจะเกิดมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

(3) ความมีขั้ว (polarity)

ความมีขั้วของตัวถูกดูดซับ นอกจากลักษณะของตัวถูกดูดซับแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับด้วย โดยเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เพราะความมีขั้วที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

(4) ผลของ $[H^+]$ หรือค่าความเป็นกรด-ด่าง

ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะมากและเร็ว เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี จะทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้วค่อนข้างจะมีประจุเล็กน้อย จึงทำให้สารที่ไม่มีขั้ว (non polarity) ในน้ำเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ

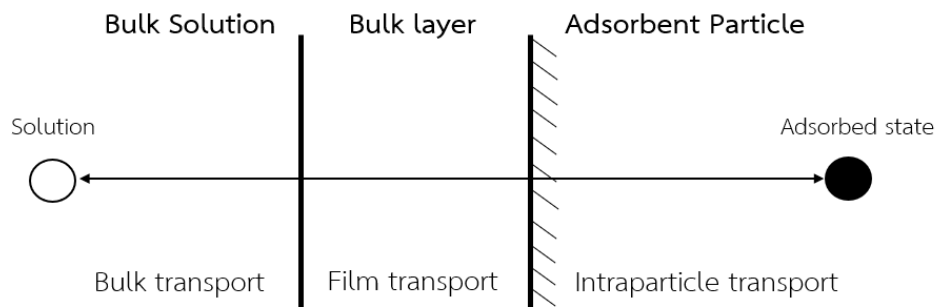
2.5.4 กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

กลไกการดูดซับ คือ การเคลื่อนที่ของสารที่ถูกดูดซับเข้าไปในตัวกลางดูดซับ โดยเกิดขึ้นเป็นขั้นตอน 3 ขั้นตอนติดต่อกัน แสดงดังรูปที่ 2.7

ขั้นตอนที่ 1 (bulk transport) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ละลายในของเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นฟิล์มของเหลวที่ห่อหุ้มตัวกลางดูดซับ ขั้นตอนนี้ เกิดขึ้นเร็วที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 (film transport) จัดเป็นขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวเคลื่อนที่มาถึงตัวกลางดูดซับโดยการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลว (film diffusion)

ขั้นตอนที่ 3 (intraparticle transport หรือ pore transport) จัดเป็นขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับเช่นกัน โดยหลังจากที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มตัวกลางดูดซับมาได้แล้วนั้น ก็จะแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (pore diffusion) เกิดเป็นการดูดซับขึ้นภายใน



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

2.5.5 จลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics)

จลนศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) และกลไกของปฏิกิริยาเคมี (mechanism) โดยแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับเทียบกับเวลา โดยในช่วงแรกของปฏิกิริยาจะมีอัตราการดูดซับที่สูงและลดลงอย่างช้า ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลสมการที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction) และปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสาร

กฎอัตราเร็ว (Rate law) (2.1)

$$\text{Rate} = k[C]^n$$

โดย C คือ ความเข้มข้นของสาร

k คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็ว ณ อุณหภูมิใด ๆ

n คือ อันดับของปฏิกิริยา

2.5.5.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction)

คือ ปฏิกิริยาที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวเป็นปฏิกิริยาที่มีอันดับ (เลขยกกำลัง) เท่ากับ 1 โดยปฏิกิริยาที่เกิด ดังนี้



เมื่อความเข้มข้นของสาร B มีค่ามากกว่าสาร A มาก ๆ เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้สาร B ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงขึ้นกับความเข้มข้นของสาร A

$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^1 = k[A] \quad (2.2)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการดังกล่าว จะได้ว่า

$$\log [A_0] = \log [A] + \frac{kt}{2.303} \quad (2.3)$$

หรือจัดรูปได้ตั้งสมการที่ 2.4 ดังนั้นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน คือ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e + \frac{kt}{2.303} \quad (2.4)$$

2.5.5.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

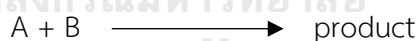
คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด ซึ่งแต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง หรือปฏิกิริยาที่มีอันดับเท่ากับ 2 (second order) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนนั้นจะขึ้นกับจำนวนของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและจำนวนของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

- (1) กรณีที่สารตั้งต้นมีชนิดเดียว



$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.5)$$

- (2) กรณีที่สารตั้งต้นมีสองชนิด



$$\text{กฎของอัตราเร็ว} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A][B] \quad (2.6)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการดังกล่าว จะได้ว่า

$$\frac{1}{[A]} = k_t + \frac{1}{[A_0]^2} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน คือ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.8)$$

- โดย q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
 k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)
 k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

2.5.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherms)

ไอโซเทอร์มการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวกลางดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

2.5.6.1 สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมการแลงเมียร์อยู่บนสมมติฐานพื้นฐานที่ว่า พื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีความเหมาะสมกับสารที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) จึงสามารถสรุปสมมติฐานได้ดังนี้

- (1) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะอยู่ในบริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ
 - (2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
 - (3) พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน โดยมีลักษณะของพื้นผิวเป็นตัวกำหนด
 - (4) พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณที่เกิดการดูดซับ
- สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.9

$$q = \frac{q_e b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.9)$$

โดย q คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

- q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

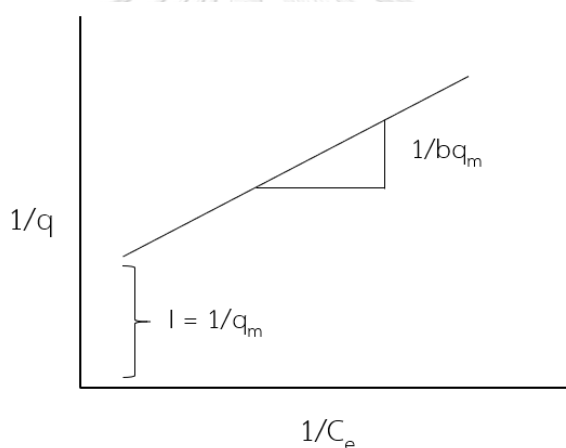
หรือ

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.10)$$

เมื่อหารสมการที่ 2.11 ด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{C_e} \left(\frac{1}{bq_m} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ที่มีความชัน (slope) เท่ากับ $1/bq_m$ และจุดตัดแกน y (intercept) เท่ากับ $1/q_m$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.5.6.2 สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชเป็นสมการที่มีการใช้งานแพร่หลายที่สุดในการใช้อธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานดังนี้

- (1) การดูดซับเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)
- (2) มีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว
- (3) สารที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มถูกดูดซับได้ง่าย
- (4) สารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นปานกลางถึงต่ำ

สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{X}{m} = K C_e^{1/n} \quad (2.12)$$

โดย X คือ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)

M คือ น้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (กรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

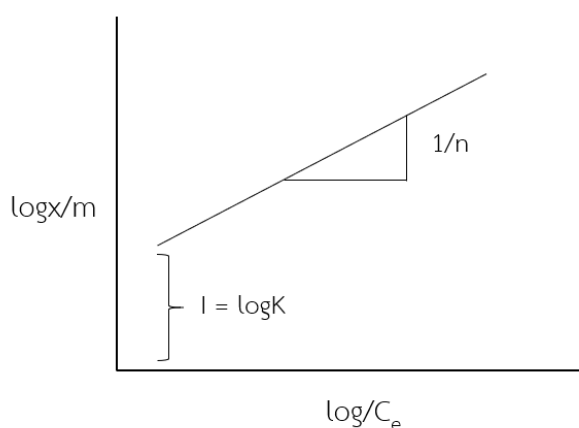
K คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$1/n$ คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)

จากสมการที่ 2.12 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป logarithmic ได้ดังนี้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(X/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงโดยมีความชัน (slope) เท่ากับ $1/n$ และ และมีจุดตัดแกน y (intercept) เท่ากับ $\log K$ ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

Sevilla and Fuertes (2009) ได้ทำการศึกษาโดยการนำเซลลูโลสมาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 220 ถึง 250 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่าเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง สามารถผลิตไฮโดรซาร์ได้มากที่สุดร้อยละ 84.3 และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่าน พบว่ามีกลุ่มเบนซีนระจุกตัวอยู่เล็กน้อย (อีเทอร์, quinone และ pyrone) ในขณะที่กลุ่มออกซิเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้น (ไฮดรอกซิล, คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลิก)

Parshetti, Kent Hoekman et al. (2013) ได้ทำการเตรียมไฮโดรซาร์จากพวงปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 150 250 และ 350 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 20 นาที พบว่าถ่านไฮโดรที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 8.033 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.043 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 3.77 นาโนเมตร และปริมาณคาร์บอนร้อยละ 54.30 ซึ่งมีค่าที่สูงที่สุดจากอุณหภูมิอื่น

Lynam, Reza et al. (2015) ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่มีวัสดุตั้งต้นจากการผสมของเม็ดซังข้าวโพด, loblolly pine, jeffrey pine, white fir และ switchgrass ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 5 ถึง 20 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สามารถผลิตไฮโดรซาร์ได้มากที่สุดร้อยละ 86.1 ที่ระยะเวลา 20 นาที จากการวิเคราะห์เอมิเซลลูโลสและลิกนินแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการมากที่สุด

Gao, Zhou et al. (2016) ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่ใช้เปลือกต้นยูคาลิปตัสเป็นวัสดุตั้งต้น โดยจะทำการศึกษาที่ 220 ถึง 300 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 2 ถึง 10 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จะมีเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส จะได้ไฮโดรซาร์ร้อยละ 46.4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300 องศาเซลเซียส ไฮโดรซาร์จะเหลือร้อยละ 40 นอกจากนี้อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอนก็ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิเช่นกัน อีกทั้งหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนก็ลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ

Nizamuddin, Mubarak et al. (2016) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันโดยมีเปลือกปาล์มเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดของไฮโดรซาร์ โดยมีการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ ที่มีต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรซาร์ พบว่าอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที และอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำร้อยละ 1.50 โดยน้ำหนัก อีกทั้งยังพบว่าอุณหภูมิมิ้อิทธิพลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรซาร์มากกว่าเวลาและอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ ความพรุนของไฮโดรซาร์เปลือกปาล์มเพิ่มขึ้นอย่างมากหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

Idowu, Li et al. (2017) ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่มีเศษอาหารเหลือทิ้งเป็นวัสดุตั้งต้น เพื่อศึกษาทำความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่มีผลต่อธาตุอาหารหลัก พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่มีผลต่อปริมาณไนโตรเจน แคลเซียม และแมกนีเซียม ในส่วนของของแข็ง ซึ่งจะรวมตัวได้ดีในอุณหภูมิสูงและระยะเวลานานขึ้น และที่อุณหภูมิ 225 และ 250 องศาเซลเซียส เริ่มมีฟอสฟอรัสที่ส่วนของของแข็ง และเมื่อที่อุณหภูมิที่ 275 องศาเซลเซียส มีฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้น จากข้อมูลนี้สามารถที่จะนำไปเป็นปุ๋ยได้เพราะมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสถึงร้อยละ 0.96 และ 2.30 ตามลำดับ

Chen, Ma et al. (2018) ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่มีของเสียจากมันหวานเป็นวัสดุตั้งต้น โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 180 ถึง 300 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 0 ถึง 120 นาที พบว่าไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณคาร์บอนในถ่านไฮโดรเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนมีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาความร้อนและปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน จากการวิเคราะห์พื้นผิวของไฮโดรคาร์บอนพบว่ามีความหยาบและมีรอยแยกบริเวณดังกล่าวอีกด้วย

Park, Lee et al. (2018) ได้ศึกษาลักษณะของไฮโดรคาร์บอนของสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันเพื่อที่จะผลิตเป็นเชื้อเพลิง โดยที่จะทำการกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 180 ถึง 270 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและลดความชื้นของสาหร่าย จากการศึกษาพบว่าปริมาณคาร์บอน อัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของไฮโดรคาร์บอนนี้จะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาการคายน้ำ และการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถสร้างพลังงานทดแทนจากสาหร่าย

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีด้วยไฮโดรคาร์บอน

Ronix, Pezoti et al. (2017) ได้นำเอากากกาแฟมาผลิตไฮโดรคาร์บอนแล้วนำไปผลิตเป็นตัวดูดซับด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 150-225 องศาเซลเซียส เพื่อดูดซับสีเมทิลีนบลู พบว่าไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เหมาะเป็นตัวดูดซับมากที่สุด ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 31.3 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับสีอยู่ที่ 34.85 มิลลิกรัมต่อกรัมและสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์

Lima, Maniezzo et al. (2018) ได้นำก้นบุงหรือเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันผลิตเป็นไฮโดรชาร์แล้วนำไปดูดซับสีเมทิลินบลู พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอร์มแลงเมียร์

Fang, Gao et al. (2015) ได้นำชีวมวลหลายชนิดเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส แล้วนำไฮโดรชาร์ที่ได้ไปดูดซับสีเมทิลินบลู พบว่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลินบลูของไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิมีประสิทธิภาพสูงสุด

Parshetti, Chowdhury et al. (2014) ได้นำเศษอาหารไปผลิตเป็นตัวดูดซับด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 250 และ 350 องศาเซลเซียส โดยจะดูดซับสี acridine orange และ rhodamine 6G พบว่าการดูดซับสีของไฮโดรชาร์เศษอาหารสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์และแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และประสิทธิภาพการดูดซับสี acridine orange และ rhodamine 6G เท่ากับ 79.36 และ 71.42 มิลลิกรัมต่อกรัม ด้วยไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

Qian, Luo et al. (2018) ได้นำไม้ไผ่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันเพื่อผลิตไฮโดรชาร์สำหรับดูดซับสีเมทิลินบลู โดยในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบสมบัติของไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันระหว่างน้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริก พบว่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของไฮโดรชาร์ที่ทำจากกรดสูงกกว่าน้ำกลั่น รวมถึงปริมาณคาร์บอนไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจนมีค่าสูงกว่า และเมื่อนำไฮโดรชาร์ทั้งสองไปดูดซับสีเมทิลินบลูพบว่าไฮโดรชาร์ที่ทำจากกรดมีความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 254.68 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าไฮโดรชาร์ที่ทำจากน้ำกลั่นซึ่งมีความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 248.34 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันสามารถผลิตตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพได้

Li, Meas et al. (2016) ได้เตรียมไฮโดรชาร์จากขี้เลื่อยไม้ไผ่ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 160-280 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวของไฮโดรชาร์ขี้เลื่อยไม้ไผ่อยู่ในช่วง 2.63-43.07 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.02 และ 0.53 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนอยู่ที่ 3.05-3.83 นาโนเมตร และเมื่อนำไฮโดรชาร์ดูดซับสีคองโกเรด พบว่าความสามารถในการดูดซับสีอยู่ที่ 33.7 มิลลิกรัมต่อกรัม และเป็นการดูดซับแบบฟรอนดลิก

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันและการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับ ทำให้เกิดความสนใจที่นำกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันมาเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าแก่ผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล

นั่นคือ กากหม้อกรอง โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน นั่นคือ ไฮโดรชาร์ ไปเป็นตัวดูดซับที่จะนำไปดูดซับสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำตาล

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ผู้วิจัย	วัสดุตั้งต้น	ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการศึกษา
1. Sevilla and Fuertes (2009)	เซลลูโลส	อุณหภูมิ 220–250°C เวลา 2, 4 ชม.	ที่อุณหภูมิ 250°C และเวลา 4 ชม. สามารถผลิตไฮโดรชาร์ได้ถึงร้อยละ 84.3 และพบหมู่เอีเทอร์, quinone และ pyrone บนพื้นผิวของชาร์ อีกทั้งยังมีหมู่ไฮดรอกซิล, คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลิกมีปริมาณเพิ่มขึ้น
2. Parshetti, Kent Hoekman et al. (2013)	พวงปาล์มน้ำมัน	อุณหภูมิ 150–250, 350°C เวลา 20 นาที	ที่อุณหภูมิ 250°C สามารถผลิตไฮโดรชาร์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 8.033 ตร.ม./ก. ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.043 ลบ.ซม./ก. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 3.77 นม. และมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 54.30
3. Lynam, Reza et al. (2015)	เม็ดซังข้าวโพด, loblolly pine, jeffrey pine, white fir และ switchgrass	อุณหภูมิ 200–280°C เวลา 5-20 นาที BTW* 1:5, 1:10	ที่อุณหภูมิ 200°C และเวลา 20 นาที สามารถผลิตไฮโดรชาร์ได้ร้อยละ 86.1
4. Gao, Zhou et al. (2016)	เปลือกยูคาลิปตัส	อุณหภูมิ 220–230°C เวลา 2-10 ชม.	ที่อุณหภูมิ 220°C สามารถผลิตไฮโดรชาร์ได้ร้อยละ 46.4

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (ต่อ)

ผู้วิจัย	วัสดุตั้งต้น	ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการศึกษา
5. Nizamuddin, Mubarak et al. (2016)	เปลือกปาล์ม	อุณหภูมิ 180–260°C เวลา 30-120 นาที BTW* 1:5, 1:10	ที่อุณหภูมิ 180°C เวลา 30 นาที และ BTW 1.50 โดยน้ำหนัก และ ความพรุนของไฮโดรซาร์เปลือกปาล์มเพิ่มขึ้นอย่างมาก
6. Idowu, Li et al. (2017)	เศษอาหาร	อุณหภูมิ 225–275°C	อุณหภูมิและระยะเวลาที่มีผลต่อ ปริมาณไนโตรเจน แคลเซียม และ แมกนีเซียมของไฮโดรซาร์
7. Chen, Ma et al. (2018)	ของเสียจากมันหวาน	อุณหภูมิ 180–300°C เวลา 0-120 นาที	ไฮโดรซาร์มี yields ลงเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิ ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น พื้นผิวของไฮโดรซาร์พบว่ามี ลักษณะหยาบและมีรอยแยก
8. Park, Lee et al. (2018)	สาหร่าย	อุณหภูมิ 180–270 °C เวลา 60 นาที	ปริมาณ คาร์บอน อัตราส่วน คาร์บอนต่อออกซิเจน และ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน ของไฮโดรซาร์เพิ่มขึ้น

หมายเหตุ *BTW (biomass to water content) คือ อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ

ตารางที่ 2.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีด้วยไฮโดรซาร์

ผู้วิจัย	วัสดุตั้งต้น	สารถูกดูดซับ	ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการศึกษา
1. Ronix, Pezoti et al. (2017)	กากกาแฟ	สีเมทิลีนบลู	ไอโซเทอร์ม	Langmuir isotherm; $R^2 = 0.9668$, $Q_m = 34.85$ มก./ก.
2. Lima, Maniezzo et al. (2018)	ก้นบุหรี	สีเมทิลีนบลู	จลนศาสตร์ ไอโซเทอร์ม	Pseudo-second order ; $R^2 = 0.9618$, $q_e = 262.93$ มก./ก. Langmuir isotherm; $R^2 = 0.9898$, $Q_m = 303.28$ มก./ก.
3. Fang, Gao et al. (2015)	ชานอ้อย, ไม้ ฮอกกี, ฟีนท	สีเมทิลีนบลู	ดูดซับแบบกะ	ไฮโดรซาร์ชานอ้อย สามารถดูดซับสีได้ดีที่สุด ซึ่งดูดซับได้ร้อยละ 99
4. Parshetti, Chowdhury et al. (2014)	เศษอาหาร	อะครีตีนออ เรนจ์ และโร ดามีน 6G	จลนศาสตร์ ไอโซเทอร์ม	Pseudo-second order ; $R^2 = 0.9618$, $q_e = 262.93$ มก./ก. Langmuir isotherm; ของอะครีตีนออเรนจ์ และโรดามีน 6G มีค่า R^2 $= 0.997$ และ 0.995 $Q_m = 79.365$ และ 71.425 มก./ก. ตามลำดับ
5. Qian, Luo et al. (2018)	ไม้ไผ่	สีเมทิลีนบลู	ความสามารถ ดูดซับ	อะครีตีนออเรนจ์ และโร ดามีน 6G เท่ากับ 79.36 และ 71.42 มก./ก. ไอโดรซาร์ไม้ไผ่มีค่าอยู่ที่ 248.34 มก./ก.

ตารางที่ 2.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีด้วยไฮโดรซาร์ (ต่อ)

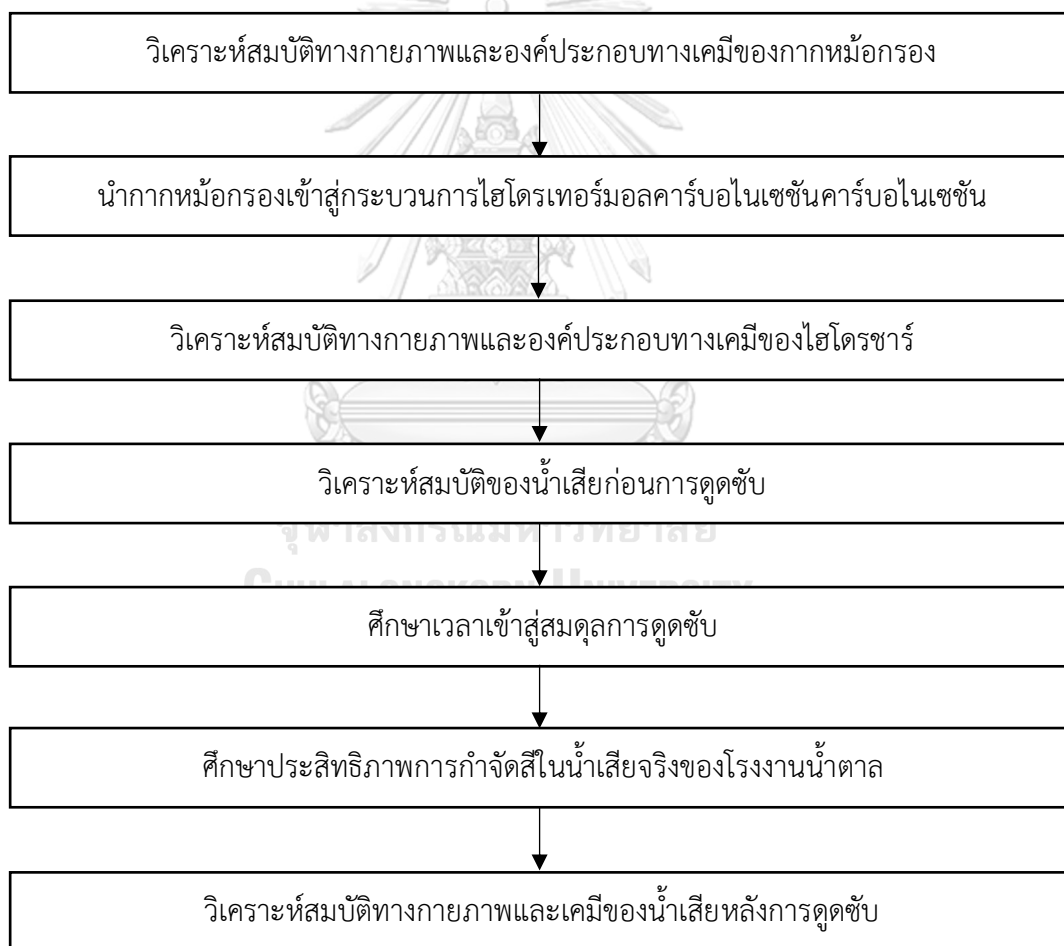
ผู้วิจัย	วัสดุตั้งต้น	สารถูกดูดซับ	ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการศึกษา
6. Li, Meas et al. (2016)	ไม้ไผ่	สีคองโก เรด	ไอโซเทอร์ม ความสามารถดูดซับ	Langmuir isotherm; $R^2 = 0.934$, $Q_m = 75.16$ มก./ก. ไฮโดรซาร์ไม้ไผ่ไม่สามารถดูดซับสีได้เท่ากับ 33.7 มก./ก.



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ใช้ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล 2 ส่วน คือ กากหม้อกรอง (filter cake) และน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยนำกากหม้อกรองเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเพื่อผลิตเป็นตัวดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงโดยใช้ตัวดูดซับที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน ซึ่งการทดลองจะดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการ หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น MS2045 บริษัท Mettler Toledo
- 2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น MS1602 บริษัท Mettler Toledo
- 3) เครื่องเขย่า (shaker) รุ่น RO500 บริษัท Gerhardt
- 4) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
รุ่น JSM-IT300 บริษัท JOEL
- 5) เครื่อง Surface Area Analyzer (SAA)
รุ่น BELSORP, mini-II nitrogen บริษัท Bel Japan
- 6) เครื่อง Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
รุ่น Spectrum One บริษัท PERKIN ELMER
- 7) เครื่อง Element Analyzer รุ่น 628 บริษัท LECO
- 8) เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer
รุ่น Spectroquant Prove 600 บริษัท merck
- 9) เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
- 10) เตาเผาความร้อนสูง (furnace)
- 11) เตาอบลมร้อน (Hot Air Oven) รุ่น FD115 บริษัท Binder
- 12) กระดาษกรอง Whatman No.2
- 13) กระดาษกรอง Whatman No.4
- 14) ถังปฏิกรณ์ความดันสูงแบบสแตนเลส
- 15) แก้วทรงกระบอก

3.1.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นสารเคมีสำหรับงานวิเคราะห์ (Analytical Reagent:

AR) ทั้งหมด

- 1) Sulfuric acid (H_2SO_4)
- 2) Sodium hydroxide (NaOH)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์ สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี มีการศึกษาทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน ซึ่งสมบัติที่ศึกษาของกากหม้อกรองและกากหม้อกรองที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันหรือไฮโดรซาร์แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยไฮโดรซาร์ที่ได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ จากนั้นนำไฮโดรซาร์ที่ได้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ดีที่สุดไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพองค์ประกอบเคมี ดังตารางที่ 3.1 โดยที่ไฮโดรซาร์ดังกล่าวจะนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์

สมบัติ	เครื่องมือ/เทคนิค
1. ไอโอดีนนัมเบอร์*	ASTM D 4607-94
2. ลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
3. พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน	Surface Area Analyzer (SAA) /BET
4. องค์ประกอบโดยประมาณ	ASTM D 1762-84
5. องค์ประกอบโดยละเอียด	Element Analyzer

หมายเหตุ * วิเคราะห์ทุกอย่างหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

3.2.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการที่ประกอบไปด้วยถึงปฏิกรณ์ความดันสูงที่ทำจากสแตนเลส มีความสูง 13.5 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.6 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 ภายในสามารถใส่แก้วทรงกระบอกมีความสูง 10.4 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.24 เซนติเมตร และปริมาตรความจุภายในประมาณ 320 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3 หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจึงใช้งานภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด



รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ความดันสูงแบบสแตนเลส

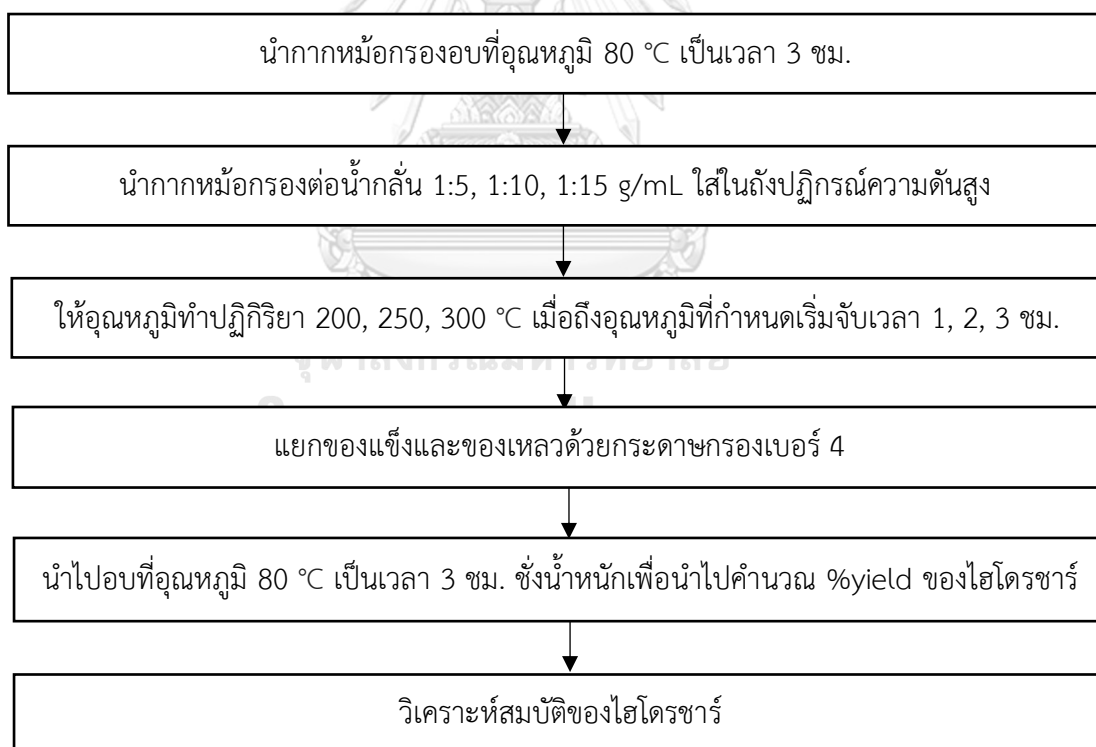


รูปที่ 3.3 แก้วทรงกระบอก

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันในงานวิจัยนี้ ศึกษาอัตราส่วนของกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น อุณหภูมิ และระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม ซึ่งการทดลองทั้งหมดจะทำ 2 ชั่วโมง แสดงดังรูป 3.4 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำกากหม้อกรองอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น และเก็บในที่แห้ง
- 2) นำกากหม้อกรองและน้ำกลั่นใส่ในแก้วทรงกระบอก โดยกำหนดอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 1:10 และ 1:15 กรัมต่อมิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้กากหม้อกรองชุ่มน้ำ แล้วนำแก้วทรงกระบอกใส่ในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

- 3) นำถึงปฏิกรณ์ความดันสูงจากข้อ 3.2.2.2 เข้าสู่เตาเผา กำหนดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส โดยมีเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) วัดอุณหภูมิภายในถึงปฏิกรณ์ความดันสูงและเมื่ออุณหภูมิถึงที่กำหนดเริ่มจับเวลา ซึ่งกำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 2 และ 3 ชั่วโมง
- 4) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดให้นำถึงปฏิกรณ์ความดันสูงออกจากเตาเผาและทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วโดยการแช่ในน้ำเย็น
- 5) แยกส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็งโดยใช้วิธีการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 ของแข็งที่ได้เรียกว่า “ไฮโดรซาร์”
- 6) ล้างไฮโดรซาร์ด้วยน้ำกลั่นจนน้ำใส แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้น
- 7) วิเคราะห์ลักษณะสมบัติและผลผลิตที่ได้ (%yield) ของไฮโดรซาร์
- 8) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) ถึง 7) อีก 1 ครั้ง



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

3.2.3 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย

เก็บตัวอย่างน้ำจากโรงงานน้ำตาลในระบบบำบัด นำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย โดยมีพารามิเตอร์และวิธีการที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย

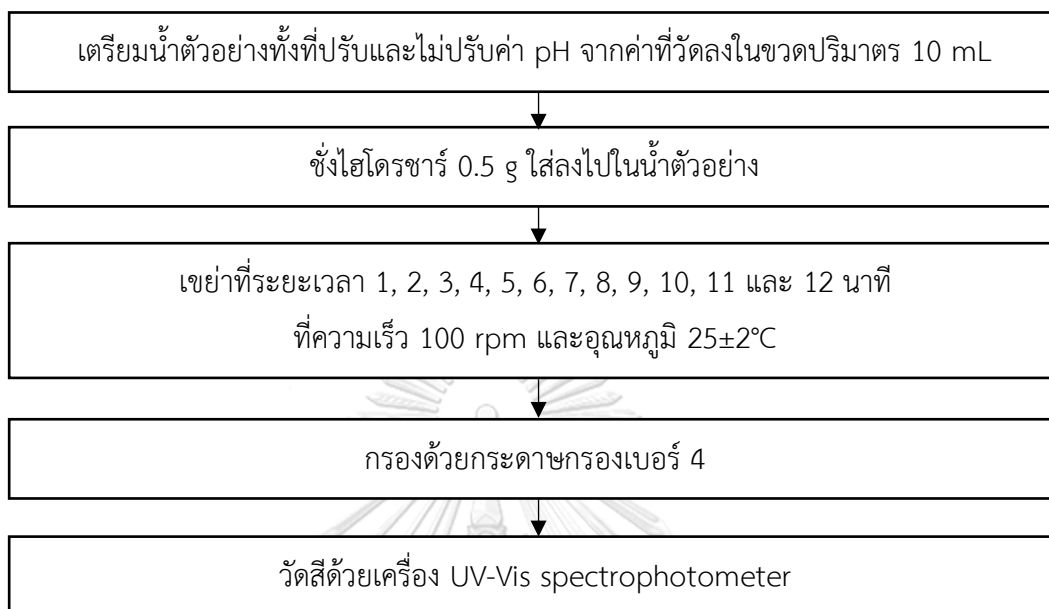
พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัด
1. ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity)	Standard methods 2510 A
2. ค่าพีเอช (pH)	Standard methods 4500-H ⁺ B. วิธี Electrometric
3. สี (color)	ADMI method
4. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	Standard methods 5220 C วิธีรีฟลักปิดแบบไทเทรชัน
5. บีโอดี (Biological Oxygen Demand: BOD)	Standard methods 5210 B
6. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended solids: TSS)	Standard methods 2540 D
7. ของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS)	Standard methods 2540 C

3.2.4 ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ

การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับนั้นใช้ไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสีในน้ำเสียจริง โดยทำการทดลองที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ 3 ค่า ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่เพิ่มขึ้น 2 ค่าจากค่าจริง และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ลดลง 2 ค่าจากค่าจริง ในปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 10 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ระยะเวลา 1-12 นาที จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีและเวลา ซึ่งการทดลองทั้งหมดจะทำ 3 ซ้ำ โดยการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5 และขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมน้ำตัวอย่างทั้งที่ปรับและไม่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
- 2) ชั่งไฮโดรคาร์บอนปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในน้ำตัวอย่าง
- 3) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 นาที ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
- 4) แยกน้ำตัวอย่างออกจากไฮโดรคาร์บอนโดยวิธีการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4

- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าสีด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer
- 6) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) ถึง 5) จำนวน 2 ครั้ง



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ

ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ

ประเภทตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการศึกษา
1. ตัวแปรต้น	- เวลา	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 นาที
2. ตัวแปรตาม	- ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้ และ ± 2 จากค่าที่วัดได้
3. ตัวแปรควบคุม	- ปริมาณตัวดูดซับ	0.5 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร
	- อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	- จำนวนรอบการเขย่า	100 รอบต่อนาที

3.2.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาลนี้ใช้ไฮโดรซาร์เป็นตัวดูดซับสีในน้ำเสีย ที่มีการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ 3 ค่า ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่เพิ่มขึ้น 2 ค่าจากค่าจริง และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ลดลง 2 ค่าจากค่าจริง ในปริมาณตัวดูดซับ 0.02-0.3 กรัมต่อน้ำเสีย 10 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิ 25±2

องศาเซลเซียส มีการเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.2.4 ซึ่งการทดลองทั้งหมดจะทำ 3 ซ้ำ โดยการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6 และขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมน้ำตัวอย่างทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
- 2) ชั่งไฮโดรซาร์ปริมาณ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28 และ 0.3 กรัม ใส่ลงไปในน้ำตัวอย่าง
- 3) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.2.4 ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
- 4) แยกน้ำตัวอย่างออกจากไฮโดรซาร์โดยวิธีการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าสีด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer
- 6) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) ถึง 5) จำนวน 2 ครั้ง



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

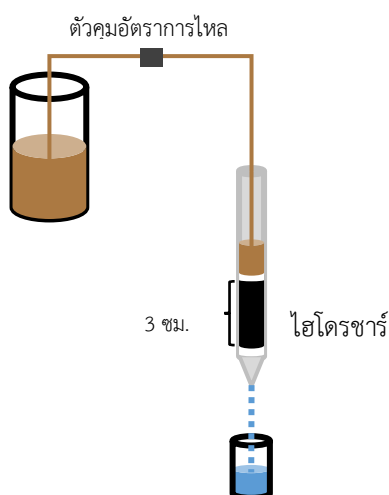
ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

ประเภทตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการศึกษา
1. ตัวแปรต้น	- ปริมาณตัวดูดซับ	0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28 และ 0.3 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร
2. ตัวแปรตาม	- ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้ และ ± 2 จากค่าที่วัดได้
3. ตัวแปรควบคุม	- เวลาสัมผัส	เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา จลนศาสตร์การดูดซับ
	- อุณหภูมิ	25 \pm 2 องศาเซลเซียส
	- จำนวนรอบการเขย่า	100 รอบต่อนาที

3.2.6 ศึกษาารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยการดูดซับสีแบบคอลัมน์จำลอง

ในการศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยการดูดซับสีแบบคอลัมน์จำลอง โดยนำน้ำเสียมาดูดซับด้วยไฮโดรซาร์ ซึ่งทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยการใส่คอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ภายในบรรจุไฮโดรซาร์ปริมาณ 5 กรัม ซึ่งมีความสูง 3 เซนติเมตร ทำการทดลองเป็นระบบไหลแบบต่อเนื่องไหลลงสู่ด้านล่าง (down flow) มีการควบคุมอัตราการไหล และเก็บตัวอย่างน้ำที่ปลายของคอลัมน์ จากนั้นวัดปริมาตร สี และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่างทันที โดยการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดลองแบบคอลัมน์

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองทั้ง 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันใช้สถิติประเภทการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple linear regression) และส่วนของการบวนการดูดซับใช้สถิติประเภทการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS) version 22

3.4 สรุปการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.5



ตารางที่ 3.5 สรุปการดำเนินงานวิจัย

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน					
กากหม้อกรอง:น้ำ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.)	จำนวนชุดทดลอง (2 ซ้ำ)	รวม	
1:5	200	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
	250	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
	300	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
1:10	200	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
	250	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
	300	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
1:15	200	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
	250	1			
		2	3*2 = 6		
		3			
	1:15	1			
		2	3*2 = 6		
		3			

ตารางที่ 3.5 สรุปการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ				
ปริมาณตัวดูดซับ(g)	pH ของน้ำเสีย	เวลา (นาที)	จำนวนชุดทดลอง (3 ซ้ำ)	รวม
0.5 g/10 mL	pH จริง	1	36*3	108
	pH จริง+2	2		
	pH จริง-2	3		
		4		
		5		
		6		
		7		
		8		
		9		
		10		
		11		
		12		
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล				
ปริมาณตัวดูดซับ(g)	pH ของน้ำเสีย	เวลา (นาที)	จำนวนชุดทดลอง (3 ซ้ำ)	รวม
0.02	pH จริง	เวลาที่ได้จาก	45*3	125
0.04	pH จริง+2	จลนศาสตร์		
0.06	pH จริง-2	การดูดซับ		
0.08				
0.10				
0.12				
0.14				
0.16				
0.18				
0.20				
0.22				
0.24				
0.26				
0.28				
0.30				

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำกากหม้อกรองวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล มาผลิตเป็นวัสดุดูดซับด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันซึ่งเรียกว่า “ไฮโดรชาร์” จากนั้นนำไฮโดรชาร์ที่ได้มาศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยใช้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพความสามารถในการดูดซับของไฮโดรชาร์ เพื่อนำไปศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลด้วยกระบวนการดูดซับ ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของกากหม้อกรอง

กากหม้อกรองหรือ filter cake ที่ใช้ในการทดลอง เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลแห่งหนึ่งในจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งตัวของวัสดุมีความชื้นสูง จึงทำการไล่ความชื้นโดยนำกากหม้อกรองมาอบที่ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเก็บไว้ในที่แห้งเพื่อรอนำไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ลักษณะทางกายภาพของกากหม้อกรองที่ออกจากกระบวนการผลิตน้ำตาล จะเป็นตะกอนมีลักษณะป่น สีน้ำตาลเข้ม มีเส้นใยเศษอ้อยผสมปะปนอยู่ และกากหม้อกรองมีสมบัติทางเคมีแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของกากหม้อกรองมีค่า 7.54 ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานของ Pluemjai, Tungkananuruk et al. (2018) ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 671 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร มีค่าสัดส่วนคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับร้อยละ 17.40 5.80 และ 1.00 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อเทียบกับงานของ Prado, Caione et al. (2013) พบว่าสัดส่วนคาร์บอนและไนโตรเจนมีค่ามากกว่า โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.5 และ 2.2 โดยน้ำหนัก ในขณะที่สัดส่วนของไฮโดรเจนกลับมีค่าน้อยกว่า เท่ากับร้อยละ 2.2 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีของกากหม้อกรอง

สมบัติทางเคมี	ค่าที่ได้	หน่วย
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7.54	
ค่าการนำไฟฟ้า	671	$\mu\text{s}/\text{cm}$
Carbon	17.40	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Hydrogen	5.80	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Nitrogen	1.00	ร้อยละโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีของกากหม้อกรอง (ต่อ)

สมบัติทางเคมี	ค่าที่ได้	หน่วย
SiO ₂	27	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Al ₂ O ₃	5.25	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	4.30	ร้อยละโดยน้ำหนัก
P ₂ O ₅	3.57	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Fe ₂ O ₃	1.63	ร้อยละโดยน้ำหนัก
MgO	1.01	ร้อยละโดยน้ำหนัก
K ₂ O	0.87	ร้อยละโดยน้ำหนัก

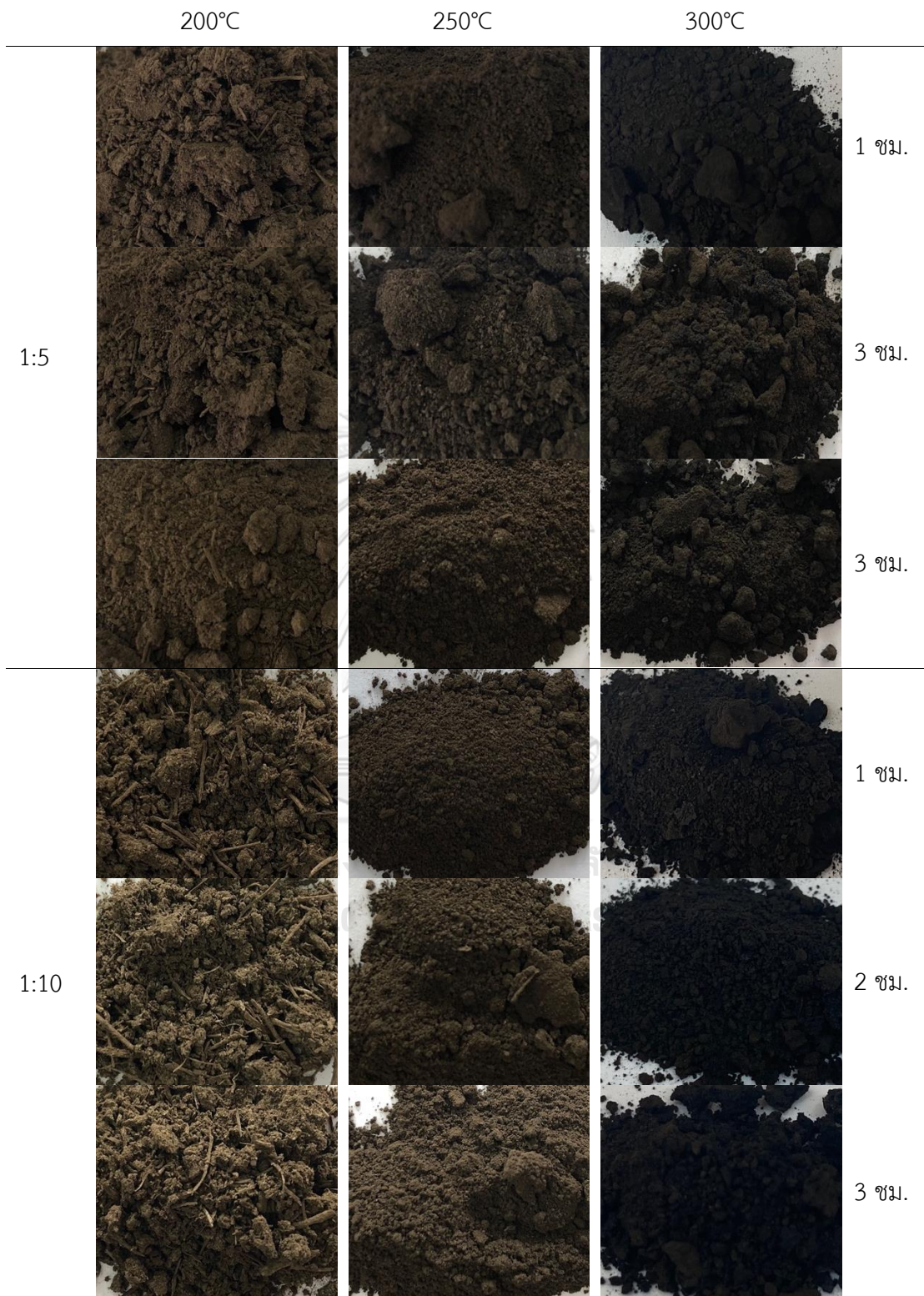
4.2 สมบัติของไฮโดรซาร์

3.2.1 สมบัติทางกายภาพของไฮโดรซาร์

หลังจากนำกากหม้อกรองผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน ผลผลิตที่ได้ เป็นลักษณะของแข็งที่แช่อยู่ในของเหลว โดยกรองของเหลวออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 แล้วนำของแข็งที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำใส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บในตู้ดูดความชื้น ซึ่งเรียกของแข็งที่ได้ว่า “ไฮโดรซาร์”

ไฮโดรซาร์ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาสูงไฮโดรซาร์จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดและสีเข้มกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จากรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่า ไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ทุกอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำและเวลาทำปฏิกิริยา มีสีน้ำตาลและมีเส้นใยของกากอ้อยเหลืออยู่อย่างเห็นได้ชัด และไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้น มีความละเอียดเพิ่มขึ้นและมีสีที่เข้มขึ้น แต่ก็มีเส้นใยของกากอ้อยบางส่วนหลงเหลืออยู่ในส่วนของไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เส้นใยของกากอ้อยได้ย่อยสลายหายไป ทำให้ไฮโดรซาร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นผงละเอียดและมีสีน้ำตาลเข้มจนเกือบดำ การที่สีของไฮโดรซาร์เข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากองค์ประกอบภายในกากหม้อกรองได้มีการย่อยสลายหายไปในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน อีกทั้งยังส่งผลให้ไฮโดรซาร์มีความละเอียดมากขึ้น

โดยผลการศึกษานี้ได้สอดคล้องกับงานของ Sermyagina, Saari et al. (2015) ได้นำไม้สนเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชันที่อุณหภูมิ 180-250 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง พบว่าสีของไฮโดรซาร์ที่เข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และงานของ Budyk and Fullana (2019) ได้นำผ้าอ้อมสำเร็จรูปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชันที่อุณหภูมิ 180-250 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง พบว่าสีเข้มขึ้นและความละเอียดของไฮโดรซาร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน





รูปที่ 4.1 ไฮโดรชาร์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

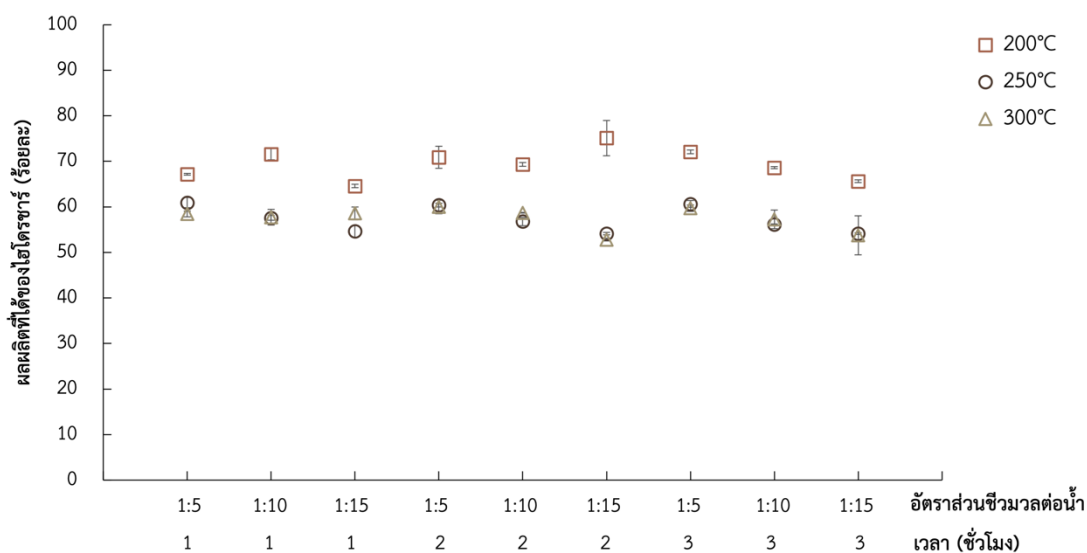
3.2.2 ผลผลิตที่ได้ (yields)

กากหม้อกรองก่อนนำเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันถูกชั่งน้ำหนักและจัดบันทึกไว้ หลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ แล้วนำไฮโดรชาร์แต่ละสถานะที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาผลผลิตที่ได้ เพื่อทราบถึงวัสดุที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ค่าผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์ทั้งหมดแสดงรูปที่ 4.2 พบว่าค่าผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์อยู่ที่ช่วงร้อยละ 52.81 ถึง 75.13 โดยน้ำหนัก โดยที่ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง เป็นสถานะที่ผลผลิตที่ได้มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 75.13 และไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 เวลา 2 ชั่วโมง เป็นสถานะที่ผลผลิตที่ได้น้อยที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 52.81 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาที่ได้บ่งชี้ได้ว่าค่าผลผลิตที่ได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิทำปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่มีอุณหภูมิสูงนั้นส่งผลให้เกิดการย่อยสลายชีวมวลได้ดี (Başakçılardan Kabakçı and Baran 2019) และในระหว่างการดำเนินกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันได้มีปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยาคายน้ำ (dehydration) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) และปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (aromatization) ส่งผลให้เกิดการลดลงของผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์

เนื่องจากการย่อยสลายของโมเลกุลขนาดใหญ่ของกากหม้อกรอง (Zhang, Jiang et al. 2019) แต่ในขณะที่ไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 เวลา 2 ชั่วโมง มีค่าผลผลิตที่ได้มากที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสนั้นเกิดจากการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสและน้ำตาลชนิดอื่น ๆ ที่อ่อนไหวต่อปฏิกิริยาความร้อน (Nakason, Panyapinyopol et al. 2018) อีกทั้ง Zhang, Jiang et al. (2019) ได้กล่าวว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิของผลผลิตที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่แตกต่างด้วยเช่นกัน

โดยผลการศึกษาข้างต้นได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานของ Santos Santana, Pereira Alves et al. (2020) ที่ได้นำเอากากกาแฟเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 150 – 250 องศาเซลเซียส ผลพบว่าเมื่ออุณหภูมิทำปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเพิ่มขึ้น ค่าผลผลิตที่ได้ของไฮโดรซาร์กากกาแฟลดลง โดยค่าผลผลิตที่ได้ที่อุณหภูมิ 150 200 และ 250 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 61.19 41.70 และ 34.23 โดยน้ำหนักตามลำดับ และงานของ Wüst, Rodriguez Correa et al. (2019) ที่นำอุจจาระแห้งเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 190 – 250 องศาเซลเซียส พบว่าค่าผลผลิตที่ได้อยู่ระหว่างร้อยละ 48.8 – 56.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.2 ผลผลิตที่ได้ร้อยละของไฮโดรซาร์

4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (iodine number)

สมบัติพื้นฐานของตัวดูดซับสามารถตรวจได้หลากหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ โดยค่าไอโอดีนนัมเบอร์นั้นเป็นการวัดปริมาณขนาดรูพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Ekpete

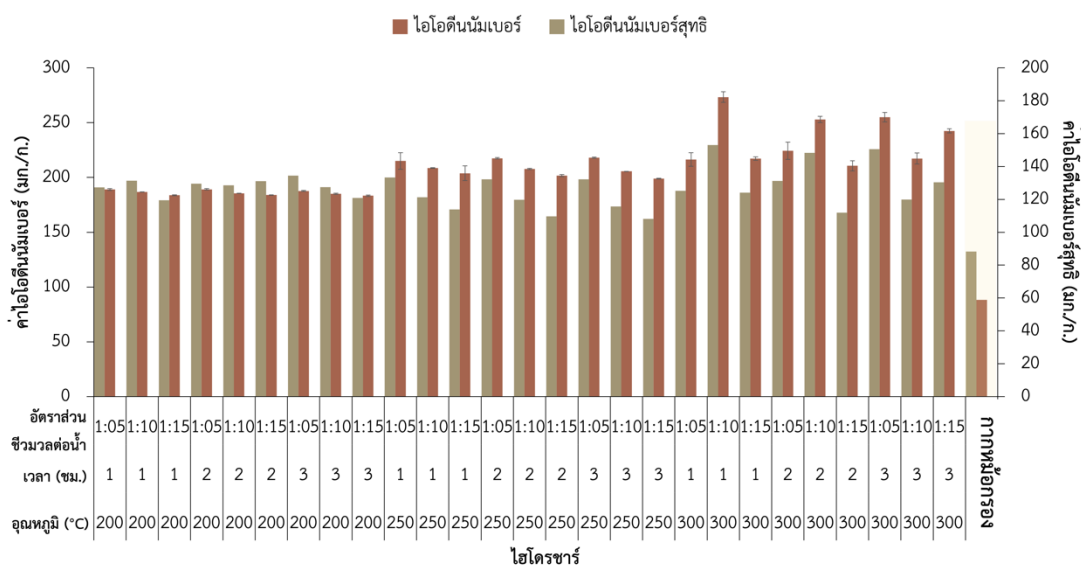
and Horsfall 2011) ซึ่งไฮโดรซาร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันทุกตัวอย่างได้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนัมเบอร์ตามวิธีการมาตรฐาน ASTM D 4607-94

ค่าไอโอดีนัมเบอร์ของไฮโดรซาร์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าค่าไอโอดีนัมเบอร์ของไฮโดรซาร์อยู่ในช่วง 183.37 ถึง 273.37 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่ค่าไอโอดีนัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามไฮโดรซาร์ที่ผลิตในช่วงอุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น นั่นบ่งชี้ได้ว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าไอโอดีนัมเบอร์ จะเห็นได้ว่าไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดูดซับไอโอดีนได้ดีกว่าไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 4.2 พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่าไอโอดีนัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 และที่เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง มีค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงที่สุดเท่ากับ 273.37 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันจะเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้น เป็นผลให้เกิดการก่อตัวของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนบนไฮโดรซาร์ (Li, Meas et al. 2016) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไฮโดรซาร์ดังกล่าวมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากที่สุด ส่งผลให้เกิดการดูดซับไอโอดีนได้ดีที่สุด ค่าไอโอดีนัมเบอร์เป็นเพียงค่าที่บอกถึงสมบัติของตัวดูดซับในเบื้องต้น ประสิทธิภาพของการดูดซับนั้นจะแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้น ๆ

อย่างไรก็ตาม ไอโอดีนัมเบอร์เพียงค่าเดียวนั้น อาจไม่เพียงพอต่อการยืนยันความเหมาะสมในการเป็นตัวแทนเพื่อเป็นตัวดูดซับ โดยควรนำค่าผลผลิตที่ได้เป็นส่วนช่วยในการประเมินควบคู่กันด้วย เพราะว่าหากไฮโดรซาร์นั้นมีค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงแต่ผลผลิตที่ได้ต่ำ อาจจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปดูดซับต่อมีปริมาณน้อย จึงได้ทำการใช้ค่าไอโอดีนัมเบอร์สุทธิของไฮโดรซาร์ทั้งหมด (แสดงดังรูปที่ 4.3) โดยคำนวณจากค่าผลผลิตที่ได้คูณกับค่าไอโอดีนัมเบอร์ของไฮโดรซาร์นั้น ๆ จากรูปสามารถยืนยันได้ว่าไฮโดรซาร์ที่มีค่าไอโอดีนัมเบอร์สุทธิสูงสุดคือ ไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และไฮโดรซาร์ที่สภาวะนี้จะถูกนำไปเป็นตัวแทนเพื่อเป็นตัวดูดซับสีของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล

ตารางที่ 4.2 สหสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนัมเบอร์กับตัวแปรที่มีผล

ตัวแปร	p-value
อุณหภูมิ	0.000
อัตราส่วนหม้อกรองต่อน้ำกลั่น	0.009
เวลา	0.408



รูปที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าไอโอดีนนัมเบอร์สุทธิของไฮโดรซาร์

4.4 องค์ประกอบทางเคมีของไฮโดรซาร์

ไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง เป็นตัวแทนเพื่อเป็นตัวดูดซับสีของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล ซึ่งถูกนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบโดยประมาณ ค่าความเป็นกรด-ด่าง องค์ประกอบโดยละเอียด พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยา และโครงสร้างพื้นที่ผิวและรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์

3.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของไฮโดรซาร์

ไฮโดรซาร์และกากหม้อกรองถูกนำมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter ยี่ห้อ Denver รุ่น UB-10 โดยที่นำไฮโดรซาร์หรือกากหม้อกรองผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:20 คนและทิ้งไว้สักพัก จากนั้นนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

จากตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่าไฮโดรซาร์ที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.60 แสดงว่าไฮโดรซาร์มีความเป็นกรดอ่อน ๆ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของไฮโดรซาร์นั้นมีค่าน้อยกว่าของกากหม้อกรองที่มีค่า 7.54 จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันได้เกิดการก่อตัวของกรดอินทรีย์ที่ละลายน้ำในระหว่างกระบวนการ และมีการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (acidic functional groups) ของไฮโดรซาร์ (Saha, Saba et al. 2019) ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจากค่าวัสดุตั้งต้น

ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างและองค์ประกอบโดยประมาณของกากหม้อกรองไฮโดรซาร์

ตัวอย่าง	ค่าความเป็น กรด-ด่าง	องค์ประกอบโดยประมาณ (โดยน้ำหนัก)			
		เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงที่	ความชื้น
กากหม้อกรอง	7.54	22.73	47.15	26.71	3.41
ไฮโดรซาร์	5.60	1.15	38.33	59.52	1.02

3.4.2 องค์ประกอบโดยประมาณของไฮโดรซาร์ (proximate analysis)

ไฮโดรซาร์และกากหม้อกรองถูกนำมาศึกษาองค์ประกอบโดยประมาณ ซึ่งมีปริมาณเถ้า (ash) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงที่ (fix carbon) และความชื้น (moisture) โดยได้ศึกษาตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1762-84

องค์ประกอบโดยประมาณแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่ากากหม้อกรองเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณความชื้น มีค่าลดลง โดยไฮโดรซาร์มีปริมาณเถ้าอยู่ที่ร้อยละ 1.15 โดยน้ำหนัก ในขณะที่กากหม้อกรองอยู่ที่ร้อยละ 22.73 โดยน้ำหนัก ซึ่งการลดลงของปริมาณเถ้านี้เกิดจากการสลายตัวของสารอนินทรีย์ในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน (Toptas Tag, Duman et al. 2018) ปริมาณสารระเหยของไฮโดรซาร์นั้นมีปริมาณลดลง เมื่อเทียบกับกากหม้อกรอง โดยกากหม้อกรองมีปริมาณเถ้าอยู่ที่ร้อยละ 57.13 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ไฮโดรซาร์มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 38.33 โดยน้ำหนัก เป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันนั้นทำให้เกิดการสูญเสียองค์ประกอบบางส่วนของสารระเหยจากการเกิดปฏิกิริยาความร้อน (Vlaskin and Vladimirov 2018) และปริมาณความชื้นของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์นั้นอยู่ที่ร้อยละ 3.41 และ 1.02 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันมีการคายน้ำเกิดขึ้นและเกิดการก่อตัวของโครงสร้างอะโรมาติกจากเซลลูโลสที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) (Budyk and Fullana 2019) ปริมาณคาร์บอนคงที่ของไฮโดรซาร์อยู่ที่ร้อยละ 59.52 โดยน้ำหนัก และกากหม้อกรองอยู่ที่ร้อยละ 26.71 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างไฮโดรซาร์ (Santos Santana, Pereira Alves et al. 2020) และเกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสในกากหม้อกรอง (Budyk and Fullana 2019) รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาตีพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลสอีกด้วย (Elaiqwu and Greenway 2019)

จากผลการศึกษาข้างต้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานของ Jian, Zhuang et al. (2018) ที่ได้นำฟางข้าวมาเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 220-280 องศา

เซลเซียส พบว่าเมื่อนำฟางข้าวเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันนั้นทำให้ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณความชื้น มีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ เทียบกับวัสดุตั้งต้น

3.4.3 องค์ประกอบโดยละเอียดของไฮโดรซาร์ (ultimate analysis)

ไฮโดรซาร์และกากหม้อกรองถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยละเอียด ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่องเครื่อง elemental analyzer รุ่น 628 บริษัท LECO ประเทศสหรัฐอเมริกา

จากตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณคาร์บอนของไฮโดรซาร์หลังเข้ากระบวนการไฮโดร เทอร์มอลคาร์บอนในเซชันอยู่ที่ร้อยละ 27.10 ซึ่งมากกว่ากากหม้อกรองที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ร้อย ละ 17.40 เป็นเพราะว่าได้เกิดปฏิกิริยาคายน้ำและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันขึ้นในระหว่าง กระบวนการซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นเหตุที่ก่อให้เกิดคาร์บอนในไฮโดรซาร์ (Başakçılardan Kabakci and Baran 2019) เช่นเดียวกันกับปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.00 เป็นร้อยละ 1.51 ซึ่ง สามารถเกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิสของคาร์บอนไฮเดรตส่วนใหญ่ในชีวมวล ในทางตรงกันข้ามปริมาณ ไฮโดรเจนของไฮโดรซาร์ลดลงจากร้อยละ 5.80 ลดลงเป็นร้อยละ 2.77 เป็นการยืนยันว่าระหว่าง กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันได้เกิดปฏิกิริยาคายน้ำ ปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชัน และ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันขึ้นกับลิกโนเซลลูโลส (Elaiwu and Greenway 2019)

โดยผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานของ Parshetti, Chowdhury et al. (2014) ที่ ได้นำเศษอาหารเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่ 250 และ 350 องศาเซลเซียส ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที พบว่าปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนของไฮโดรซาร์เศษอาหารเพิ่ม สูงขึ้นหลังจากเข้ากระบวนการ โดยมีปริมาณคาร์บอนของไฮโดรซาร์อยู่ที่ยังร้อยละ 52.23-56.75 ซึ่งเศษ อาหารอยู่ที่ยังร้อยละ 35.2 และปริมาณไนโตรเจนของไฮโดรซาร์อยู่ที่ยังร้อยละ 2.07-3.38 ซึ่งเศษอาหาร อยู่ที่ยังร้อยละ 1.5 ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนของไฮโดรซาร์ลดลงโดยมีค่าอยู่ที่ยังร้อยละ 4.31-5.70 เมื่อ เทียบกับเศษอาหารที่มีค่าอยู่ที่ยังร้อยละ 5.6

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบโดยละเอียดของไฮโดรซาร์

ตัวอย่าง	องค์ประกอบโดยละเอียด (%)		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน
กากหม้อกรอง	17.40	5.80	1.00
ไฮโดรซาร์	27.10	2.77	1.51

4.5 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน

ไฮโดรซาร์ที่เป็นตัวแทนในการนำไปดูดซับสีในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาล ถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติสำคัญของการเป็นตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ด้วยเครื่อง surface area analyzer รุ่น BELSORP, mini-II nitrogen adsorptometer บริษัท Bel japan โดยใช้เทคนิคบรูน่าวอร์-เอ็มเมทท์-เทลเลอร์ (Bruauer-Emmett-Teller, BET) ซึ่งนำมาค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกากหม้อกรองวัสดุตั้งต้น

จากตารางที่ 4.5 พบว่าไฮโดรซาร์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน โดยพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์เพิ่มสูงขึ้น 2.5 เท่าของกากหม้อกรอง ปริมาตรรูพรุนของไฮโดรซาร์เพิ่มสูงขึ้น 4.5 เท่าของกากหม้อกรอง และขนาดรูพรุนของไฮโดรซาร์เพิ่มสูงขึ้น 1.8 เท่าของกากหม้อกรอง เป็นการชี้ให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันสามารถเป็นกระบวนการที่ผลิตตัวดูดซับได้ เนื่องจากระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันได้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่มีผลต่อการสร้างรูพรุนที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้นบนไฮโดรซาร์ (Li, Meas et al. 2016) และมีการแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนหรือเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นการทำลายโครงสร้างเส้นใยของวัสดุตั้งต้น และปริมาณของสารระเหยก็เป็นส่วนหนึ่งของการเกิดพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์ด้วยเช่นกัน หากมีสารระเหยมากพื้นที่ผิวก็จะยิ่งมากเช่นเดียวกัน (Liu, Ma et al. 2018) ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ดีที่ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาทำปฏิกิริยาสั้น ๆ สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเป็นวัสดุดูดซับได้ โดยที่สามารถลดการใช้พลังงานสิ้นเปลืองและลดระยะเวลาการผลิตตัวดูดซับได้

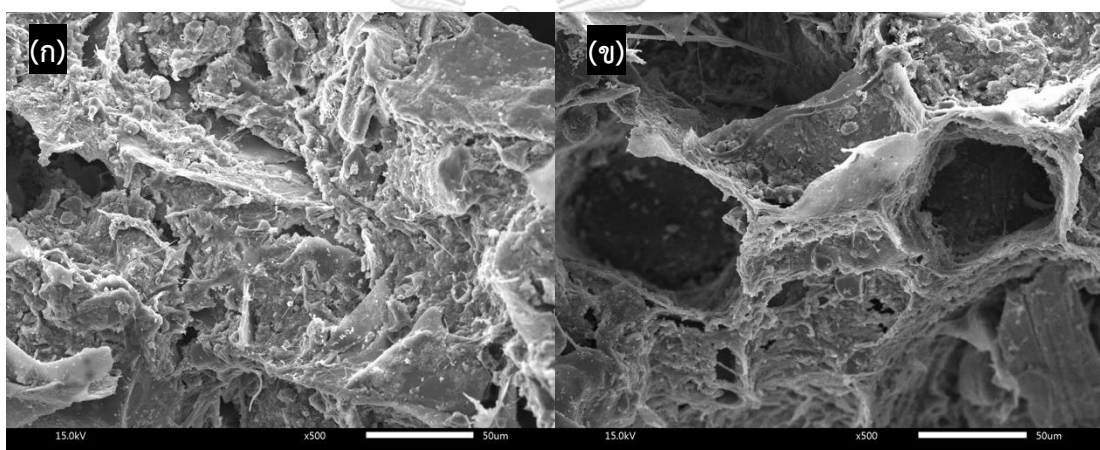
ผลการศึกษาข้างต้นนั้นสอดคล้องกับงานของ Saqib, Baroutian et al. (2018) ซึ่งได้นำเศษอาหารเหลือทิ้งมาเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์เศษอาหารเพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ที่ 5.23-7.14 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ที่ 0.009-0.09 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.70-6.14 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน (nm)
กากหม้อกรอง	2.0059	0.00685	13.67
ไฮโดรซาร์	4.9962	0.03066	24.55

4.6 โครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยา

ไฮโดรซาร์และกากหม้อกรองถูกนำมาศึกษาลักษณะโครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยาและโครงสร้างพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope) ผลการศึกษาพบว่าลักษณะพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์มีลักษณะขรุขระ มีความลึกตื้นชัดเจน มีรูพรุนเกิดขึ้น และมีโครงสร้างรูพรุนแบบรังผึ้ง ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวที่ดี (Liu, Zhai et al. 2020) ในขณะที่พื้นที่ผิวของกากหม้อกรองนั้นค่อนข้างเรียบ ไม่มีรูพรุน แสดงดังรูปที่ 4.4 บ่งชี้ได้ว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเป็นกระบวนการที่ส่งเสริมให้เกิดการก่อตัวของโพรงที่กระจายอยู่บนพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์ (Ronix, Pezoti et al. 2017) และทำให้เกิดสมบัติที่เหมาะสมกับการเป็นตัวดูดซับ

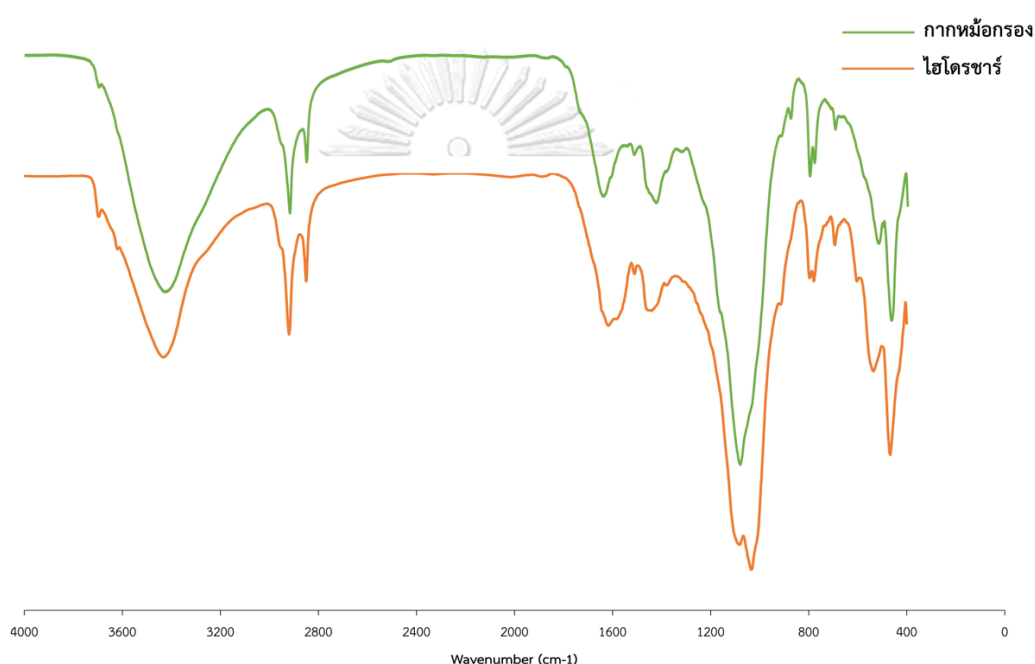


รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยาของ (ก) กากหม้อกรองและ (ข) ไฮโดรซาร์

4.7 หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์

ไฮโดรซาร์และกากหม้อกรองถูกนำมาศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR Spectroscopy) ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรด (IR) ของไฮโดรซาร์มีพีค (peak) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในบริเวณพีคที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับกากหม้อกรอง จากการจำแนกพีคพบว่าบนพื้นผิวไฮโดรซาร์นั้นมีหมู่ O-H อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3600-3000 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มไฮดรอกซิลและกลุ่มคาร์บอนิล เป็นการบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน C-H อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3000-2800 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มอะลิฟาติก C-O อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1200-950 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มฟีนอล เอสเทอร์ และอะลิฟาติกแอลกอฮอล์ C=C อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1650-1500 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มวงแหวนอะโรมาติกในลิกนิน นั้นหมายความว่าลิกนินบนไฮโดรซาร์ไม่ได้หายไปสนิทในสภาวะที่ศึกษา และ C-H อยู่ในช่วงความ

ยาวคลื่น 875-750 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มอะโรมาติก ซึ่งว่าได้มีปฏิกิริยาที่สลายหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เช่น ปฏิกิริยาไดออกซิเจนเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาคายน้ำ (Elaiqwu and Greenway 2019) และผลของสเปกตรัมอินฟราเรดนั้นเป็นการบ่งบอกว่าบนพื้นผิวไฮโดรคาร์บอนมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนอีกด้วย ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานของ Zhang, Wang et al. (2015) ที่ได้ศึกษาสเปกตรัมอินฟราเรดของไฮโดรคาร์บอนซังข้าวโพด



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมอินฟราเรดของกากหม้อกรองและไฮโดรชาร์

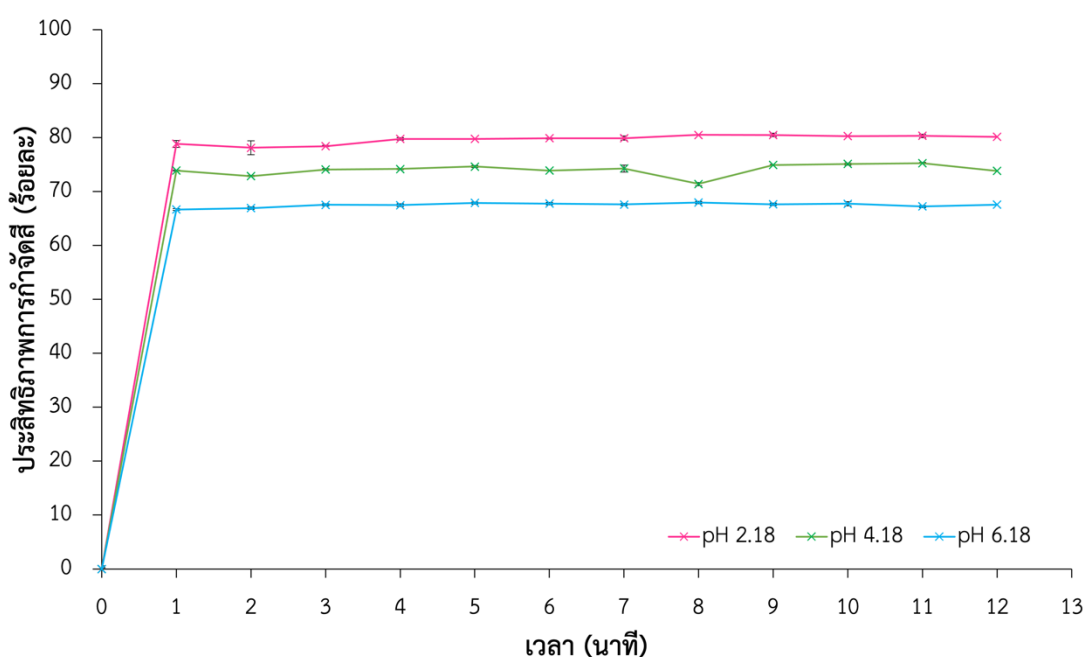
จากการศึกษาสมบัติการดูดซับของไฮโดรชาร์ที่เตรียมจากกากหม้อกรอง สรุปได้ว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันสามารถเป็นกระบวนการที่ผลิตตัวดูดซับได้ จึงได้นำไฮโดรชาร์ดังกล่าวไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาล

4.8 เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

ไฮโดรชาร์ที่ได้จากการเตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่มีวัสดุตั้งต้นเป็นกากหม้อกรอง ถูกนำมาศึกษาเวลาในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล เพื่อหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time) โดยที่ศึกษาในน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างจริง (pH = 4.18) และสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ± 2 จากความเป็นกรด-ด่างจริง (pH = 6.18, 2.18) ของน้ำเสีย ด้วย

ไฮโดรซาร์ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0-12 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.6 การกำจัดสีในน้ำเสียของไฮโดรซาร์ในทุกช่วงความเป็นกรด-ด่าง เข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างรวดเร็วมาก ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่า 1 นาที โดยจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้นทันทีในนาทีที่หนึ่ง และมีค่าคงที่ ซึ่งการดูดซับในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก เมื่อเทียบกับงานของ (Madduri, Elsayed et al. 2020) ที่นำไฮโดรซาร์ไม้ไผ่มาดูดซับสีเมทิลีนบลู พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ที่นาทีที่ 480

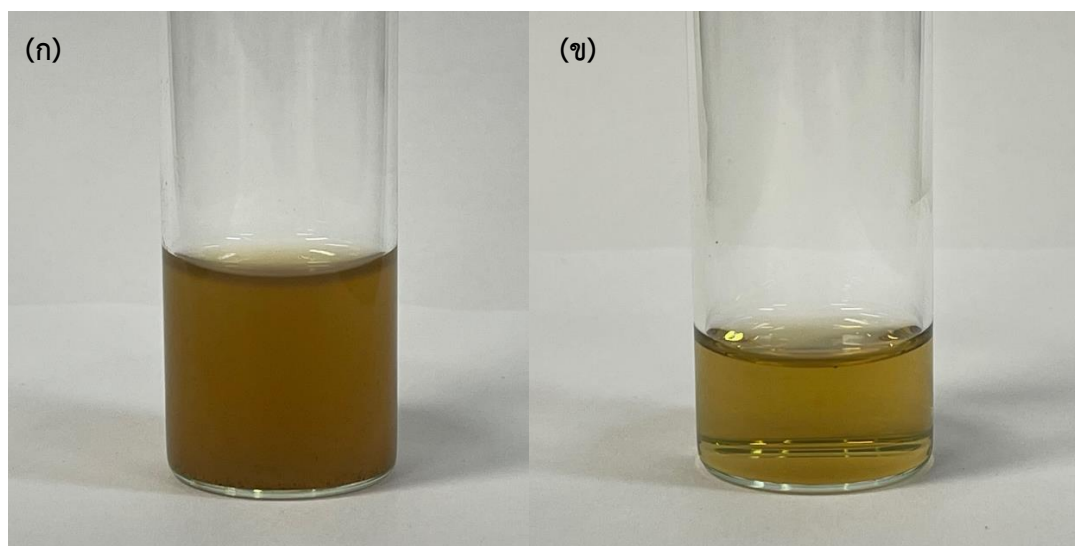


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ ด้วยไฮโดรซาร์ ณ เวลาต่าง ๆ

4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

ไฮโดรซาร์ที่ได้จากการเตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่มีวัสดุตั้งต้นเป็นกากหม้อกรอง ถูกนำมาศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำตาลที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างจริง และสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ± 2 จากความเป็นกรด-ด่างจริงของน้ำเสีย โดยใช้ปริมาณไฮโดรซาร์ 0.02-0.3 กรัม ต่อน้ำเสีย 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลนั้นมีสีน้ำตาลเข้ม แสดงดังรูปที่ 4.7 อีกทั้งได้ทำการศึกษาหาความยาวคลื่นมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) นั้นเป็นการนำน้ำเสียจริงมาหาค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) สูงสุดที่ความยาวคลื่นในช่วงความยาวคลื่น

200 ถึง 900 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ทั้งนี้ประเทศไทยได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ได้กำหนดมาตรฐานสีของน้ำทิ้งไม่เกิน 300 ADMI (American Dye Manufacturers Institute) ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

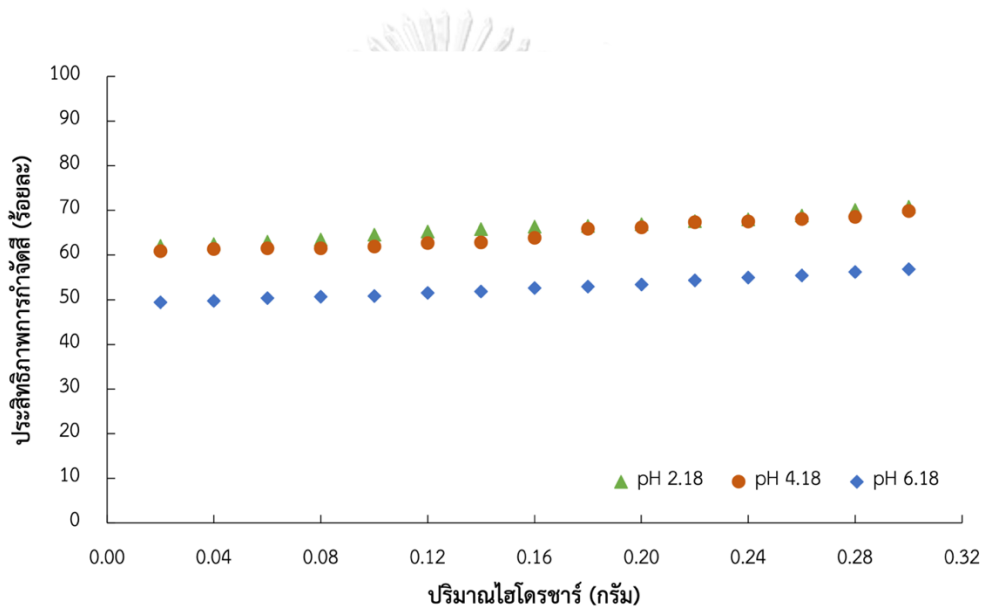


รูปที่ 4.7 น้ำเสียของโรงงานน้ำตาล (ก) ก่อน และ (ข) หลังดูดซับ

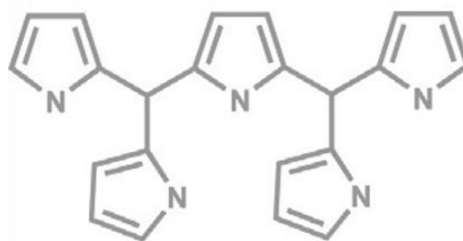
ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงาน แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ต่าง -2 (pH=2.18) สามารถกำจัดสีได้มากที่สุดที่ร้อยละ 70.84 รองลงมาคือ น้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ต่างจริง (pH=4.18) และน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ต่างจริง +2 (pH=6.18) ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 69.90 และ 56.87 ตามลำดับ นั้นแสดงว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียของไฮโดรซาร์เกิดได้ดีที่สภาวะเป็นกรด เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างโมเลกุลของสารในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาล กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไฮโดรซาร์ ซึ่งสารในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลดังกล่าวนี้ อาจเป็นสารในกลุ่มเมลานอยดิน (Melanoidins) (รูปที่ 4.9) (Sahu and Chaudhari 2015) ซึ่งเป็นกลุ่มสารสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลกับกรดอะมิโนเมื่อได้รับความร้อนในปฏิกิริยาเมลลาร์ดจากกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยสามารถยืนยันจากค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer พบว่าน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 295 นาโนเมตร ซึ่ง Chandra, Kumar et al. (2018) รายงานว่าเป็นสารในกลุ่มเมลานอยดิน

ไฮโดรซาร์ในการศึกษาดังนี้ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 4.9962 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุน 0.0306 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ บ่งชี้ได้ว่าการดูดซับแบบการเติมรูพรุน

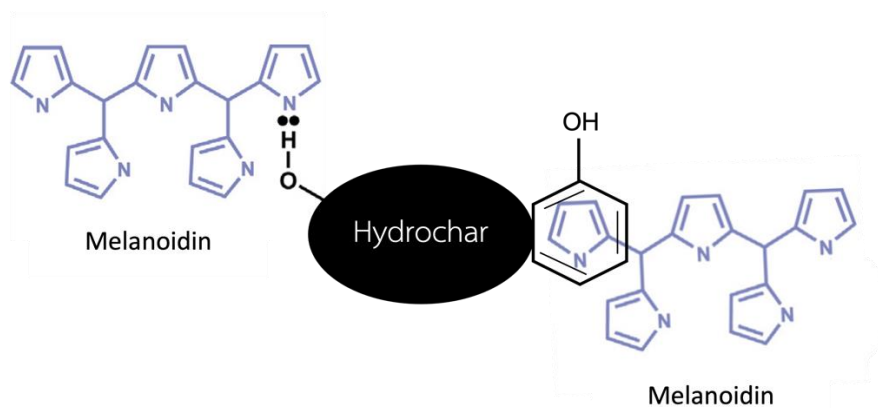
(Pore Filling) ในกลไกการดูดซับไม่สามารถใช้อธิบายกลไกการดูดซับสีของไฮโดรซาร์ได้ นั้นแสดงว่าการดูดซับสีในน้ำเสียจริงของไฮโดรซาร์อาจมีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตเป็นบทบาทสำคัญในการเกิดกลไกการดูดซับ (Tran, You et al. 2017) หรือมีการแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูดซับด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือเกิดอันตรกิริยา Pi-Stacking ($\pi-\pi$) ระหว่างวงแหวนบนไฮโดรซาร์กับวงแหวนเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic aromatic rings) ของเมลานอยดินในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาล (Liakos and Lazaridis 2016) แสดงดังรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตามไฮโดรซาร์นั้นไม่สามารถดูดซับหรือดูดซับสารที่เป็นองค์ประกอบของสีในน้ำเสียได้น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียของไฮโดรซาร์นั้นไม่ได้สูงมากนัก



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงที่สภาวะความเป็นกรด-ต่างต่าง ๆ ด้วยไฮโดรซาร์



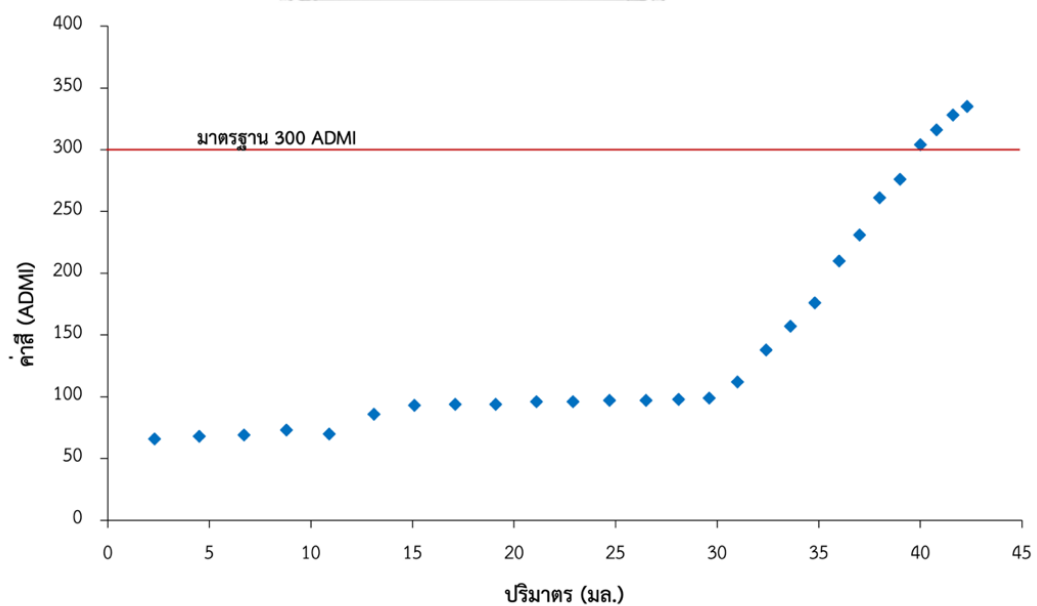
รูปที่ 4.9 โครงสร้างหลักของสารกลุ่มเมลานอยดิน (Liakos and Lazaridis 2016)



รูปที่ 4.10 กลไกที่เป็นไปได้ของการดูดซับสีในน้ำเสียของไฮโดรชาร์

4.10 การดูดซับสีในคอลัมน์จำลอง

การดูดซับสีในคอลัมน์จำลองนั้นเป็นการศึกษากระบวนการดูดซับในการใช้งานจริง โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการดูดซับแบบต่อเนื่องด้วยคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และภายในบรรจุไฮโดรชาร์ปริมาณ 5 กรัม ซึ่งมีความสูง 3 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และเก็บน้ำที่ออกจากปลายคอลัมน์ไปวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer โดยจะศึกษาเวลาที่ไฮโดรชาร์สามารถดูดซับสีของน้ำเสียจนกระทั่งค่าสีที่ได้เกินมาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้



รูปที่ 4.11 ค่าสีของน้ำที่วัดได้หลังจากผ่านคอลัมน์จำลองทุก 10 นาที

ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.11 ในช่วง 10-50 นาทีแรกของการดูดซับสีในคอลัมน์จำลองนั้น ไฮโดรซาร์สามารถดูดซับสีได้ดี มีค่าสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์อยู่ในช่วง 66-70 ADMI หลังจากนาทิตั้ง 60 ไฮโดรซาร์ยังสามารถดูดซับสีได้อย่างต่อเนื่องถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเล็กน้อยก็ตาม จนถึงนาทิตั้ง 150 กราฟมีจุดหักขึ้นเรียกว่า breakthrough point นั้นแสดงว่าความสามารถการดูดซับสีของไฮโดรซาร์เริ่มหมดไปตั้งแต่นาทีที่ 150 และสังเกตต่อไปพบว่านาทิตั้ง 160 ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอย่างชัดเจนมากขึ้น ซึ่งค่าสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์อยู่ที่ 112 ADMI และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงนาทิตั้ง 240 พบว่าค่าสีของน้ำเท่ากับ 304 ADMI ซึ่งเกินมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานที่กำหนดไว้ 300 ADMI บ่งชี้ว่าไฮโดรซาร์ไม่สามารถดูดซับสีให้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดได้ อีกทั้งการดูดซับแบบคอลัมน์จำลองมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงหลายส่วน ได้แก่ ชนิดของตัวดูดซับ อัตราการไหลของน้ำเสีย และชั้นความหนาของตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ ถ้าหากคอลัมน์มีขนาดใหญ่ ชั้นความหนาของตัวดูดซับสูงและอัตราการไหลต่ำจะทำให้ น้ำเสียสัมผัสกับไฮโดรซาร์ได้นานมากขึ้น (El-Qada, Abdelghany et al. 2013) ส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซับที่เริ่มหมดประสิทธิภาพและเวลาสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลายาวนานขึ้น สรุปได้ว่าไฮโดรซาร์สามารถบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลที่ไม่เกินมาตรฐาน ได้ในเวลา 230 นาที ซึ่งมีค่าสีเท่ากับ 276 ADMI นั่นคือการดูดซับสีแบบคอลัมน์จำลองด้วยไฮโดรซาร์เริ่มอิ่มตัวที่นาทิตั้ง 230 หลังจากนั้นไฮโดรซาร์สามารถดูดซับสีต่อไปได้อีก เพียงแต่น้ำหลังจากผ่านคอลัมน์นั้นค่าสีเกินมาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด และผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีของไฮโดรซาร์ปริมาณ 5 กรัมในคอลัมน์จำลองสามารถบำบัดน้ำเสียให้ค่าสีไม่เกินมาตรฐานได้ปริมาตร 40 มิลลิลิตร หรือเท่ากับ 2.633 ปริมาตรบรรจุคอลัมน์ (Bed Volume)

4.11 สมบัติของน้ำหลังการดูดซับด้วยกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์

ทำการศึกษสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล โดยวิเคราะห์น้ำในแต่ละพารามิเตอร์ก่อนและหลังการดูดซับด้วยกากหม้อกรองและไฮโดรซาร์ ซึ่งใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม น้ำเสีย 10 มิลลิลิตร เขย่าที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาพบว่าน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนดูดซับอยู่ที่ 4.81 ค่าสีอยู่ที่ 3,530 ADMI ค่าซีไอดี บีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณของแข็งแขวนละลายทั้งหมดอยู่ที่ 4,266 2,403 684 และ 1,054 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 339 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร จากตารางที่ 4.6 พบว่าไฮโดรซาร์สามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานได้ดีกว่ากากหม้อกรองทุกพารามิเตอร์ ซึ่งค่าของน้ำหลังจากบำบัดทุกพารามิเตอร์ที่ดูดซับด้วยไฮโดรซาร์ ได้แก่ สีมีค่าอยู่ที่ 1,000 ADMI ซีไอดี บีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดมีค่าอยู่ที่ 3,156 1,769 273 และ 467 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่มีค่า 6.34 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ตามประกาศ

กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 จากค่าของน้ำเสียทุกพารามิเตอร์ชี้ชัดได้ว่าไฮโดรคาร์บอนมีประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีกว่ากากหม้อกรอง

ตารางที่ 4.6 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลก่อนและหลังการดูดซับ

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำหลังการดูดซับ		ค่ามาตรฐาน ¹
		กากหม้อกรอง	ไฮโดรคาร์บอน	
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	4.18	4.22	6.34	5.5-9
สี (ADMI)	3,530	3,523	1,000	300
ซีโอดี (มก./ล.)	4,266	4,230	3,156	120
บีโอดี (มก./ล.)	2,403	2,331	1,769	20
ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	339	316	245	ไม่กำหนด
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)	684	670	273	50
ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (มก./ล.)	1,054	954	467	3,000

¹ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560

โดยทั่วไปน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลจะเกิดจากน้ำล้างในกระบวนการผลิต ซึ่งอาจปนเปื้อนด้วยน้ำจากการผลิตน้ำตาล สารซักฟอก อนุภาคของขานอ้อย น้ำมันและจารบีที่ใช้ในการหล่อลื่นและอนุภาคน้ำตาลที่หลุดหายไปในช่วงกระบวนการ ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้ส่งผลให้น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลมีสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารอาหาร (nutrients) ปริมาณสูง (Fitto, Tefera et al. 2019) อีกทั้งยังมีคาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) น้ำมันและไขมัน (oil and grease) คลอไรด์ (chlorides) ซัลเฟต (sulfates) และโลหะ (metals) ส่งผลให้น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลมีค่าซีโอดี บีโอดี และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง (Kushwaha 2015) จากตารางที่ 4.6 น้ำหลังจากบำบัดทุกพารามิเตอร์ที่ดูดซับด้วยไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ สี การนำไฟฟ้า ซีโอดี บีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนดูดซับ แต่ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนั้น ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งอาจเนื่องจากปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดนั้นบ่งบอกถึงปริมาณของแข็งทั้งสารอินทรีย์ และอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งปกติแล้วโมเลกุลเหล่านี้สามารถแตกตัวเป็น

ไอออนได้ แต่เนื่องจากน้ำเสียโรงงานน้ำตาลสารประกอบในน้ำอาจไม่ได้แตกตัวเป็นไอออนได้ทุกตัว หรือมีการแตกตัวน้อย ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำเพราะไอออนในน้ำมีความเข้มข้นน้อย และไม่เป็นที่ทางเดียวกันกับค่าของปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด และเนื่องด้วยไฮโดรคาร์มีค่าบ่งชี้ถึงสมบัติการเป็นตัวดูดซับน้อย อาทิเช่น พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว หรือโมเลกุลที่ต้องการดูดซับมีขนาดไม่เท่ากับขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่เกิดขึ้นไม่สูง อีกทั้งน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ซึ่งไฮโดรคาร์ในการศึกษานี้ไม่สามารถดูดซับได้ดี ทำให้คาร์ไม่สามารถกำจัดซีไอดีในน้ำเสียได้มาก



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการนำกากหม้อกรองเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันเพื่อผลิตเป็นตัวดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลนั้น มีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 สมบัติของกากหม้อกรอง

กากหม้อกรองเป็นตะกอนมีลักษณะปน สีน้ำตาลเข้ม มีเส้นใยเศษอ้อยผสมปะปนอยู่ ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 671 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร มีค่าสัดส่วนคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน เท่ากับร้อยละ 17.40 5.80 และ 1.00 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

5.1.2 สมบัติของไฮโดรชาร์

5.1.2.1 สมบัติทางกายภาพของไฮโดรชาร์

ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ทุกอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำและเวลาทำปฏิกิริยา มีสีน้ำตาลและมีเส้นใยของกากอ้อยเหลืออยู่อย่างเห็นได้ชัด และไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้น มีความละเอียดเพิ่มขึ้นและมีสีที่เข้มขึ้น แต่ก็ยังมีเส้นใยของกากอ้อยบางส่วนหลงเหลืออยู่ในส่วนของไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เส้นใยของกากอ้อยได้ย่อยสลายหายไป ทำให้ไฮโดรชาร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นผงละเอียดและมีสีน้ำตาลเข้มจนเกือบดำ

5.1.2.2 ผลผลิตที่ได้ (yields)

ค่าผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์อยู่ที่ช่วงร้อยละ 52.81 ถึง 75.13 โดยน้ำหนัก โดยที่ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง เป็นสถานะที่ผลผลิตที่ได้มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 75.13 และไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 เวลา 2 ชั่วโมง เป็นสถานะที่ผลผลิตที่ได้น้อยที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 52.81 โดยน้ำหนัก

5.1.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์

ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 และที่เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดเท่ากับ 273.37 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สุทธิสูงสุดเท่ากับ 153.09 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของไฮโดรชาร์

5.1.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของไฮโดรชาร์

ไฮโดรซาร์ที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.60 แสดงว่าไฮโดรซาร์มีความเป็นกรดอ่อน ๆ

5.1.4.2 องค์ประกอบโดยประมาณของไฮโดรซาร์

ไฮโดรซาร์มีปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงที่ และปริมาณความชื้น เท่ากับร้อยละ 1.15 38.33 59.52 และ 1.02 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

5.1.4.3 องค์ประกอบโดยละเอียดของไฮโดรซาร์

ไฮโดรซาร์มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับร้อยละ 27.10 2.77 และ 1.51 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

5.1.5 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน

ไฮโดรซาร์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน โดยพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์เพิ่มสูงขึ้น 2.5 เท่าของกากหม้อกรอง ปริมาตรรูพรุนของไฮโดรซาร์เพิ่มสูงขึ้น 4.5 เท่าของกากหม้อกรอง และขนาดรูพรุนของไฮโดรซาร์เพิ่มสูงขึ้น 1.8 เท่าของกากหม้อกรอง ซึ่งพื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 4.9962 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนมีค่าเท่ากับ 0.030663 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 24.55 นาโนเมตร

5.1.6 โครงสร้างอสังฐานวิทยา

ลักษณะพื้นผิวของไฮโดรซาร์มีลักษณะขรุขระ มีความลึกต้นชัดเจน มีรูพรุนเกิดขึ้น และมีโครงสร้างรูพรุนแบบรังผึ้ง ในขณะที่พื้นผิวของหม้อกรองนั้นค่อนข้างเรียบ ไม่มีรูพรุน

5.1.7 หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์

พื้นผิวไฮโดรซาร์มีหมู่ O-H อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3600-3000 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มไฮดรอกซิลและกลุ่มคาร์บอนิล C-H อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3000-2800 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มอะลิฟาติก C-O อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1200-950 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มฟีนอล เอสเทอร์ และอะลิฟาติกแอลกอฮอล์ C=C อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1650-1500 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มวงแหวนอะโรมาติกในลิกนิน คีตา และ C-H อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 875-750 ต่อเซนติเมตร เป็นตัวแทนของกลุ่มอะโรมาติก

5.1.8 เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

การกำจัดสีของน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างจริง (pH = 4.18) และสภาวะความเป็นกรด-ด่าง 2.18 และ 6.18 ของไฮโดรซาร์เข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างรวดเร็วมากภายในเวลา 1 นาที

5.1.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล

ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ด่าง 2.18 สามารถกำจัดสีได้มากที่สุดตั้งแต่ร้อยละ 62.08 ถึง 70.84 รองลงมาคือน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างจริง

(pH=4.18) และน้ำเสียที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างจริง 6.18 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 60.87 ถึง 69.90 และ 49.45 ถึง 56.87 ตามลำดับ

5.1.10 การดูดซับสีในคอลัมน์จำลอง

ไฮโดรซาร์ที่ศึกษาจากการดูดซับสีในคอลัมน์จำลอง โดยที่ใช้ไฮโดรซาร์ 5 กรัม ซึ่งมีความสูง 3 เซนติเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างที่ปลายคอลัมน์ทุก 10 นาทีจนค่าสีเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง ผลพบว่าสามารถบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลที่ไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งได้ปริมาณ 40 มิลลิลิตรหรือ 0.593 ปริมาตรบรรจุคอลัมน์ ซึ่งมีค่าสีเท่ากับ 276 ADMI

จากการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่า กากหม้อกรองสามารถผลิตเป็นตัวดูดซับได้ในที่นี้คือไฮโดรซาร์ และเมื่อนำไปดูดซับสีในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลพบว่า ไฮโดรซาร์จากการศึกษาครั้งนี้สามารถดูดซับสีได้ในระดับหนึ่ง แต่อาจต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 นำไฮโดรซาร์ที่ได้ไปศึกษาการดูดซับสารชนิดอื่น ๆ

5.2.2 ไฮโดรซาร์ที่ได้ควรนำไปกระตุ้น (activate) ก่อนนำไปศึกษาการดูดซับ การกระตุ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น

5.2.3 ศึกษาหาแนวทางอื่น ๆ ที่ทำให้กากหม้อกรองเกิดประโยชน์ เนื่องจากกากหม้อกรองยังมีเหลือทิ้งจำนวนมากและในปัจจุบันยังไม่ได้มีแนวทางที่ทำให้เกิดประโยชน์มากนัก

บรรณานุกรม

- Başakçılardan Kabakçı, S. and S. S. Baran (2019). "Hydrothermal carbonization of various lignocellulosics: Fuel characteristics of hydrochars and surface characteristics of activated hydrochars." Waste Management 100: 259-268.
- Budyk, Y. and A. Fullana (2019). "Hydrothermal carbonization of disposable diapers." Journal of Environmental Chemical Engineering 7(5): 103341.
- Chandra, R., V. Kumar and S. Tripathi (2018). "Evaluation of molasses-melanoidin decolourisation by potential bacterial consortium discharged in distillery effluent." Biotech 8(4): 187.
- Chen, X., X. Ma, X. Peng, Y. Lin and Z. Yao (2018). "Conversion of sweet potato waste to solid fuel via hydrothermal carbonization." Bioresource Technology 249: 900-907.
- Department of Agricultural and Biological Engineering, U. o. I. (2013). "Illini Algae - Hydrothermal Liquefaction." Retrieved 15 September, 2018, from <http://algae.illinois.edu/projects/hydrothermal.html>.
- Ekpete, O. and M. Horsfall (2011). "Preparation and characterization of activated carbon derived from fluted pumpkin stem waste (*Telfairia occidentalis* Hook F)." Res J Chem Sci 1(3): 10-17.
- El-Qada, E. N., E. A. Abdelghany and Y. H. Magdy (2013). "Utilization of activated carbon for the removal of basic dyes in fixed-bed microcolumn." International Journal of Energy and Environment 4(5): 815-824.
- Elaigwu, S. E. and G. M. Greenway (2019). "Characterization of Energy-Rich Hydrochars from Microwave-Assisted Hydrothermal Carbonization of Coconut Shell." Waste and Biomass Valorization 10(7): 1979-1987.
- Fang, J., B. Gao, J. Chen and A. R. Zimmerman (2015). "Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts." Chemical Engineering Journal 267: 253-259.
- Fito, J., N. Tefera, H. Kloos and S. W. H. Van Hulle (2019). "Physicochemical Properties of the Sugar Industry and Ethanol Distillery Wastewater and Their Impact on the Environment." Sugar Tech 21(2): 265-277.

- Gan, J. and W. Yuan (2013). "Operating condition optimization of corncob hydrothermal conversion for bio-oil production." Applied Energy 103: 350-357.
- Gao, P., Y. Zhou, F. Meng, Y. Zhang, Z. Liu, W. Zhang and G. Xue (2016). "Preparation and characterization of hydrochar from waste eucalyptus bark by hydrothermal carbonization." Energy 97: 238-245.
- Hwang, I.-H., H. Aoyama, T. Matsuto, T. Nakagishi and T. Matsuo (2012). "Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment using subcritical water." Waste Management 32(3): 410-416.
- Idowu, I., L. Li, J. R. V. Flora, P. J. Pellechia, S. A. Darko, K. S. Ro and N. D. Berge (2017). "Hydrothermal carbonization of food waste for nutrient recovery and reuse." Waste Management 69: 480-491.
- Jian, X., X. Zhuang, B. Li, X. Xu, Z. Wei, Y. Song and E. Jiang (2018). "Comparison of characterization and adsorption of biochars produced from hydrothermal carbonization and pyrolysis." Environmental Technology & Innovation 10: 27-35.
- Kushwaha, J. P. (2015). "A review on sugar industry wastewater: sources, treatment technologies, and reuse." Desalination and Water Treatment 53(2): 309-318.
- Li, B., J. Guo, K. Lv and J. Fan (2019). "Adsorption of methylene blue and Cd(II) onto maleylated modified hydrochar from water." Environmental Pollution 254: 113014.
- Li, Y., A. Meas, S. Shan, R. Yang and X. Gai (2016). "Production and optimization of bamboo hydrochars for adsorption of Congo red and 2-naphthol." Bioresource Technology 207: 379-386.
- Liakos, T. I. and N. K. Lazaridis (2016). "Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption." Journal of Water Process Engineering 10: 156-164.
- Libra, J. A., K. S. Ro, C. Kammann, A. Funke, N. D. Berge, Y. Neubauer, M.-M. Titirici, C. Fühner, O. Bens, J. Kern and K.-H. Emmerich (2011). "Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis." Biofuels 2(1): 71-106.
- Lima, H. H. C., R. S. Maniezzo, V. L. Kupfer, M. R. Guilherme, M. P. Moises, P. A. Arroyo and A. W. Rinaldi (2018). "Hydrochars based on cigarette butts as a recycled material for the adsorption of pollutants." Journal of Environmental Chemical Engineering 6(6): 7054-7061.

Liu, X., Y. Zhai, S. Li, B. Wang, T. Wang, Y. Liu, Z. Qiu and C. Li (2020). "Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of feed-water pH on hydrochar's physicochemical properties, organic component and thermal behavior." Journal of Hazardous Materials 388: 122084.

Liu, Y., S. Ma and J. Chen (2018). "A novel pyro-hydrochar via sequential carbonization of biomass waste: Preparation, characterization and adsorption capacity." Journal of Cleaner Production 176: 187-195.

Lynam, J. G., M. T. Reza, W. Yan, V. R. Vásquez and C. J. Coronella (2015). "Hydrothermal carbonization of various lignocellulosic biomass." Biomass Conversion and Biorefinery 5(2): 173-181.

Madduri, S., I. Elsayed and E. B. Hassan (2020). "Novel oxone treated hydrochar for the removal of Pb(II) and methylene blue (MB) dye from aqueous solutions." Chemosphere 260: 127683.

Metcalf and Eddy (2014). Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. New York, McGraw-Hill.

Nakason, K., B. Panyapinyopol, V. Kanokkantung, N. Viriya-empikul, W. Kraithong and P. Pavasant (2018). "Hydrothermal carbonization of unwanted biomass materials: Effect of process temperature and retention time on hydrochar and liquid fraction." Journal of the Energy Institute 91(5): 786-796.

Nizamuddin, S., N. M. Mubarak, M. Tiripathi, N. S. Jayakumar, J. N. Sahu and P. Ganesan (2016). "Chemical, dielectric and structural characterization of optimized hydrochar produced from hydrothermal carbonization of palm shell." Fuel 163: 88-97.

Ozkan, L., T. H. Erguder and G. N. Demirer (2010). "Investigation of the effect of culture type on biological hydrogen production from sugar industry wastes." Waste Management 30(5): 792-798.

Parande, A. K., A. Sivashanmugam, H. Beulah and N. Palaniswamy (2009). "Performance evaluation of low cost adsorbents in reduction of COD in sugar industrial effluent." Journal of Hazardous Materials 168(2): 800-805.

Park, K. Y., K. Lee and D. Kim (2018). "Characterized hydrochar of algal biomass for producing solid fuel through hydrothermal carbonization." Bioresource Technology 258: 119-124.

Parshetti, G. K., S. Chowdhury and R. Balasubramanian (2014). "Hydrothermal conversion of urban food waste to chars for removal of textile dyes from contaminated waters." Bioresource Technology 161: 310-319.

Parshetti, G. K., S. Kent Hoekman and R. Balasubramanian (2013). "Chemical, structural and combustion characteristics of carbonaceous products obtained by hydrothermal carbonization of palm empty fruit bunches." Bioresource Technology 135: 683-689.

Pluemjai, N., N. Tungkananuruk, K. Tungkananuruk and D. Ketrot (2018). "Utilization of Filter Cake from Sugarcane Factory for Alternative Fertilizer and Reducing Soil Degradation after Sugarcane Cultivation." KKU RESEARCH JOURNAL (GRADUATE STUDY) 18(July-September).

Prado, R. d. M., G. Caione and C. N. S. Campos (2013). "Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture." Applied and Environmental Soil Science 2013: 581984.

Qian, W.-C., X.-P. Luo, X. Wang, M. Guo and B. Li (2018). "Removal of methylene blue from aqueous solution by modified bamboo hydrochar." Ecotoxicology and Environmental Safety 157: 300-306.

Reza, M. T., E. Rottler, L. Herklotz and B. Wirth (2015). "Hydrothermal carbonization (HTC) of wheat straw: Influence of feedwater pH prepared by acetic acid and potassium hydroxide." Bioresource Technology 182: 336-344.

Ronix, A., O. Pezoti, L. S. Souza, I. P. A. F. Souza, K. C. Bedin, P. S. C. Souza, T. L. Silva, S. A. R. Melo, A. L. Cazetta and V. C. Almeida (2017). "Hydrothermal carbonization of coffee husk: Optimization of experimental parameters and adsorption of methylene blue dye." Journal of Environmental Chemical Engineering 5(5): 4841-4849.

Saha, N., A. Saba and M. T. Reza (2019). "Effect of hydrothermal carbonization temperature on pH, dissociation constants, and acidic functional groups on hydrochar from cellulose and wood." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 137: 138-145.

Sahu, O. (2016). "Degradation of colour and chemical oxygen demand of sugar industry wastewater by thermo-chemical combined processes." Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management 6: 194-205.

Sahu, O. P. and P. K. Chaudhari (2015). "Removal of color and chemical oxygen demand from sugar industry wastewater using thermolysis processes." Desalination and Water

Treatment 56(7): 1758-1767.

Santos Santana, M., R. Pereira Alves, W. M. da Silva Borges, E. Francisquini and M. C. Guerreiro (2020). "Hydrochar production from defective coffee beans by hydrothermal carbonization." Bioresource Technology 300: 122653.

Saqib, N. U., S. Baroutian and A. K. Sarmah (2018). "Physicochemical, structural and combustion characterization of food waste hydrochar obtained by hydrothermal carbonization." Bioresource Technology 266: 357-363.

Sermyagina, E., J. Saari, J. Kaikko and E. Vakkilainen (2015). "Hydrothermal carbonization of coniferous biomass: Effect of process parameters on mass and energy yields." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 113: 551-556.

Sevilla, M. and A. B. Fuertes (2009). "The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose." Carbon 47(9): 2281-2289.

Toptas Tag, A., G. Duman and J. Yanik (2018). "Influences of feedstock type and process variables on hydrochar properties." Bioresource Technology 250: 337-344.

Tran, H. N., S.-J. You, T. V. Nguyen and H.-P. Chao (2017). "Insight into the adsorption mechanism of cationic dye onto biosorbents derived from agricultural wastes." Chemical Engineering Communications 204(9): 1020-1036.

Vlaskin, M. S. and G. N. Vladimirov (2018). "Hydrothermal Carbonization of Organic Components from Municipal Solid Waste." Theoretical Foundations of Chemical Engineering 52(6): 996-1003.

Wang, C., J. Pan, J. Li and Z. Yang (2008). "Comparative studies of products produced from four different biomass samples via deoxy-liquefaction." Bioresource Technology 99(8): 2778-2786.

Wüst, D., C. Rodriguez Correa, K. U. Suwelack, H. Köhler and A. Kruse (2019). "Hydrothermal carbonization of dry toilet residues as an added-value strategy – Investigation of process parameters." Journal of Environmental Management 234: 537-545.

Yokoyama, S. and M. Yukihiro (2008). The asian biomass handbook. Japan, Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries.

Zhang, L., Q. Wang, B. Wang, G. Yang, L. A. Lucia and J. Chen (2015). "Hydrothermal Carbonization of Corncob Residues for Hydrochar Production." Energy & Fuels 29(2): 872-

876.

Zhang, Y., Q. Jiang, W. Xie, Y. Wang and J. Kang (2019). "Effects of temperature, time and acidity of hydrothermal carbonization on the hydrochar properties and nitrogen recovery from corn stover." *Biomass and Bioenergy* 122: 175-182.

กรกิจ ทันสมัย (2554). แนวทางการจัดการผลผลิตพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล. ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

กลุ่มส่งเสริมอุตสาหกรรมชีวภาพ. (2561). "ความรู้ด้านเทคโนโลยีชีวภาพที่ใช้การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ จากอ้อยและสภาพการณ์ข้อมูลการผลิตอุตสาหกรรมชีวภาพ." Retrieved 25 สิงหาคม, 2561, from <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/9659-4776.pdf> .

ทิพวรรณ แก้วหนู and หิรัญกุล พลรัตน์ (2560). "ศาสตร์ด้านน้ำตาล." *วารสารน้ำตาล* 1(1): 33-46.





ภาคผนวก ก

ไฮโดรคาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1 ผลผลิตที่ได้และค่าความเป็นกรดต่างของไฮโดรซาร์

อุณหภูมิ (°C)	ไฮโดรซาร์		ผลผลิต (%)	pH
	เวลา (ชม.)	อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ		
200	1	1:05	67.14±0.19	5.63
	1	1:10	71.55±1.23	5.44
	1	1:15	64.60±0.41	5.53
	2	1:05	70.91±2.41	5.52
	2	1:10	69.32±0.41	5.38
	2	1:15	75.13±3.88	5.59
	3	1:05	72.08±0.40	5.44
	3	1:10	68.59±0.23	5.48
	3	1:15	65.63±0.31	5.59
250	1	1:05	60.94±1.09	5.53
	1	1:10	57.59±0.55	5.71
	1	1:15	54.63±1.25	5.77
	2	1:05	60.40±0.40	5.67
	2	1:10	56.77±0.86	5.63
	2	1:15	54.13±0.25	5.81
	3	1:05	60.63±0.75	5.66
	3	1:10	56.14±0.14	5.79
	3	1:15	54.13±0.19	5.82
300	1	1:05	58.45±0.60	5.45
	1	1:10	57.73±1.73	5.60
	1	1:15	58.56±1.44	5.65
	2	1:05	60.00±1.50	5.65
	2	1:10	58.70±0.07	5.57
	2	1:15	52.81±0.31	5.71
	3	1:05	59.71±0.71	5.57
	3	1:10	57.23±2.05	5.55
	3	1:15	53.78±4.28	5.66

ตารางที่ 2 องค์ประกอบโดยประมาณของไฮโดรซาร์

ไฮโดรซาร์		องค์ประกอบโดยประมาณ (%wt)				
Temp. (°C)	Time (h)	BTW ^a	Ash	VM ^b	FC ^c	Moisture
200	1	1:05	1.09±0.02	46.89±0.37	50.12±0.40	1.90±0.01
200	1	1:10	1.09±0.01	45.32±1.97	51.09±1.82	2.57±0.03
200	1	1:15	0.96±0.14	44.45±4.79	54.64±1.55	2.25±0.14
200	2	1:05	1.04±0.01	45.89±0.95	50.84±1.36	2.16±0.28
200	2	1:10	1.10±0.09	45.83±0.11	50.99±0.12	2.08±0.15
200	2	1:15	1.06±0.13	44.80±0.28	50.81±0.95	2.66±0.16
200	3	1:05	0.97±0.11	44.64±1.97	49.92±1.02	2.17±0.35
200	3	1:10	0.99±0.22	44.32±2.84	53.26±1.60	2.08±0.08
200	3	1:15	0.95±0.15	43.62±0.16	52.92±0.04	2.51±0.04
250	1	1:05	1.13±0.03	42.97±0.74	54.45±0.83	1.46±0.13
250	1	1:10	1.20±0.06	43.08±0.71	54.74±0.01	1.42±0.01
250	1	1:15	1.10±0.20	41.76±2.34	57.10±0.26	1.40±0.06
250	2	1:05	1.14±0.05	43.20±0.71	53.94±0.16	1.27±0.02
250	2	1:10	1.11±0.06	42.62±1.72	54.94±1.78	1.32±0.12
250	2	1:15	1.07±0.17	41.35±0.83	57.05±0.15	1.09±0.05
250	3	1:05	1.09±0.07	41.52±1.18	54.68±0.74	1.35±0.06
250	3	1:10	1.03±0.11	40.96±0.22	56.30±0.69	1.14±0.01
250	3	1:15	1.07±0.11	39.57±0.53	58.36±0.60	1.00±0.04
300	1	1:05	1.13±0.01	41.08±0.15	56.84±0.16	0.96±0.00
300	1	1:10	1.15±0.08	38.33±0.15	59.52±0.26	1.02±0.04
300	1	1:15	1.07±0.07	37.84±2.76	60.12±2.69	0.98±0.01
300	2	1:05	1.31±0.01	39.32±0.08	58.42±0.09	0.96±0.03
300	2	1:10	1.18±0.03	39.65±0.24	58.21±0.21	0.97±0.01
300	2	1:15	1.21±0.03	36.10±1.07	61.78±1.07	0.92±0.03
300	3	1:05	1.19±0.01	36.86±0.08	60.98±0.08	0.98±0.00
300	3	1:10	1.13±0.03	37.61±0.75	60.32±0.76	0.95±0.04
300	3	1:15	1.24±0.01	33.35±1.27	64.48±1.24	0.95±0.04

หมายเหตุ ^a biomass to water, ^b volatile matter, ^c fix carbon



ตารางที่ 3 ผลการดูดซับแบบคอลัมน์จำลองที่อัตราการไหล 0.5 มล./นาที ไฮโดรซาร์ 5 กรัม

time (min)	Volume (mL)	Color (ADMI)	%removal	pH	COD (mg/L)
0		3190		3.871	4266.67
10	2.3	66	97.93		
20	2.2	68	97.87		
30	2.2	69	97.84	7.331	17.78
40	2.1	73	97.71		
50	2.1	70	97.81		
60	2.2	86	97.30	7.377	35.56
70	2.0	93	97.08		
80	2.0	94	97.05		
90	2.0	94	97.05	7.415	35.56
100	2.0	96	96.99		
110	1.8	96	96.99		
120	1.8	97	96.96	7.416	53.33
130	1.8	97	96.96		
140	1.6	98	96.93		
150	1.5	99	96.90	7.357	213.33
160	1.4	112	96.49		
170	1.4	138	95.67		
180	1.2	157	95.08	7.345	640.00
190	1.2	176	94.48		
200	1.2	210	93.42		
210	1.0	231	92.76	7.269	1066.67
220	1.0	261	91.82		
230	1.0	276	91.35		
240	1.0	304	90.47	7.088	1440.00
250	0.8	316	90.09		
260	0.8	328	89.72		
270	0.7	335	89.50	7.131	1493.33

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวรัชมล วิฐวัฒนา
วัน เดือน ปี เกิด	25 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	สงขลา ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	198/123 หมู่ 1 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY