

การผลิตวัสดุคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานน้ำตาล
เพื่อใช้ลดค่าสีน้ำเชื่อมดิบ

PRODUCTION OF CARBONACEOUS MATERIALS FROM WASTE
IN SUGAR FACTORY FOR DECOLORIZATION OF RAW SYRUP

วิฑูรย์ นุ่มชูศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การผลิตวัสดุคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานน้ำตาล
เพื่อใช้ลดค่าสีน้ำเชื่อมดิบ

วิทวัส ฉ่ำชื่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

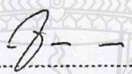
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

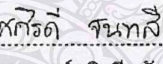
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตวัสดุคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานน้ำตาลเพื่อลดค่าสีน้ำตาลเชื่อม
ดิบ
Production of Carbonaceous Materials from Waste in Sugar Factory
for Decolorization of Raw Syrup

ชื่อ - นามสกุล นายวิฑูรย์ ฉ่ำชื่น
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ไชยยันต์ ไชยยะ, ประ.ด.
ปีการศึกษา 2567

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์วิราภรณ์ ผิวสะอาด, D.Eng.)


กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชนาธิป สามารถ, วศ.ด.)


กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิธร จันทสี, วศ.ด.)


กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ไชยยันต์ ไชยยะ, ประ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพจน์ ภานุประสิทธิ์, Ph.D.)
วันที่ 18 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2568

หัวข้อวิทยานิพนธ์: การผลิตวัสดุคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานน้ำตาล
เพื่อลดค่าสีน้ำเชื่อมดิบ
ชื่อ - นามสกุล: นายวิวัฒน์ ฉ่ำชื่น
สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ไชยยันต์ ไชยยะ, ประ.ด.
ปีการศึกษา: 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาล ได้แก่ กากอ้อย กากหม้อกรอง และของผสมระหว่างกากอ้อย/กากหม้อกรอง ถูกนำมาผลิตเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความพรุนเพื่อนำกลับมาใช้ลดค่าสีน้ำเชื่อมดิบในกระบวนการ วัสดุดังกล่าวถูกนำไปผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 °C โดยการใช้ความร้อนที่เหลือจากหม้อต้มไอน้ำ ตามด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิ 700–900 °C

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่าง BA900 มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 366.32 m²/g ปริมาตรรูพรุน 0.105 cm³/g และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย 2.51 นาโนเมตร เมื่อนำ BA900 มาทดสอบการลดค่าสีน้ำเชื่อมดิบ เปรียบเทียบกับการใช้เรซินซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในกระบวนการฟอกสีน้ำตาลทั่วไป พบว่าค่าการดูดซับสูงสุด (Q_m) ที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของเรซินมีค่าเท่ากับ 270.27 IU/g ในขณะที่ BA900 มีค่าเท่ากับ 178.57 IU/g

จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าการนำ BA900 มาใช้ทดแทนเรซินในกระบวนการลดค่าสีน้ำตาล แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการลดค่าสีได้ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโดยน้ำหนัก แต่การใช้ BA900 ก็แสดงให้เห็นว่าเป็นการลงทุนที่ต่ำมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 0.16 ปี พร้อมกับจุดแข็งของการนำวัสดุ ความร้อน และไอน้ำเหลือทิ้งในโรงงานมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : กากอ้อย, ถ่านกัมมันต์, การลดค่าสีน้ำเชื่อม, เศรษฐศาสตร์เชิงเทคโนโลยี

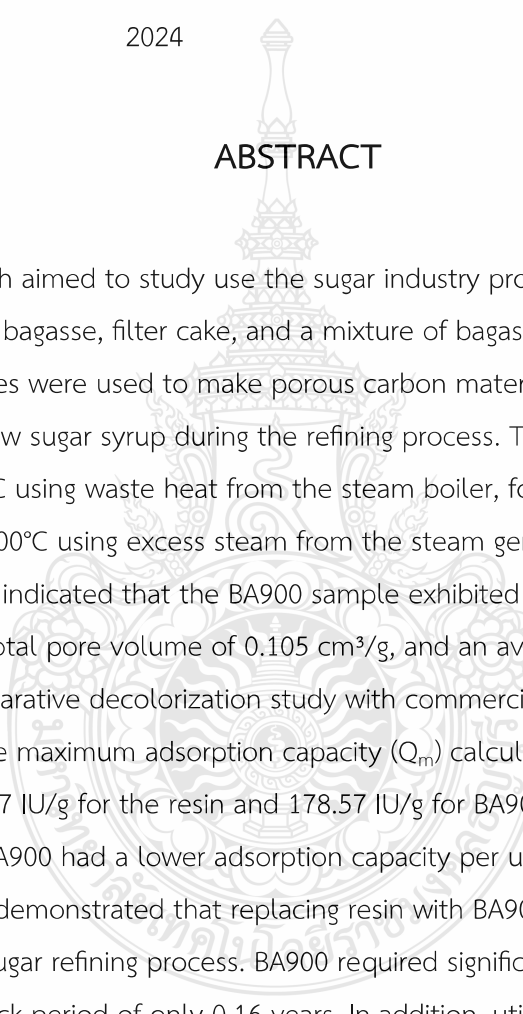
Thesis Title: Production of Carbonaceous Materials from Waste in
Sugar Factory for Decolorization of Raw Syrup

Name-Surname: Mr. Witthawat Chomchuen

Major Subject: Chemical Engineering

Thesis Advisor: Associate Professor Chaiyan Chaiya, Ph.D.

Academic Year: 2024



ABSTRACT

This research aimed to study use the sugar industry produces various by-products, including bagasse, filter cake, and a mixture of bagasse/filter cake. In this study, these residues were used to make porous carbon materials for the decolorization of raw sugar syrup during the refining process. The materials were carbonized at 500°C using waste heat from the steam boiler, followed by steam activation at 700–900°C using excess steam from the steam generation process.

The results indicated that the BA900 sample exhibited the highest surface area of 366.32 m²/g, a total pore volume of 0.105 cm³/g, and an average pore diameter of 2.51 nm. In a comparative decolorization study with commercial resin commonly used in sugar refining, the maximum adsorption capacity (Q_m) calculated from the Langmuir isotherm was 270.27 IU/g for the resin and 178.57 IU/g for BA900.

Although BA900 had a lower adsorption capacity per unit weight, a techno-economic analysis demonstrated that replacing resin with BA900 is a cost-effective alternative in the sugar refining process. BA900 required significantly lower investment costs, with a payback period of only 0.16 years. In addition, utilizing residues, waste heat, and excess steam in the sugar factory emphasizes the environmental benefits and promotes the sustainability of the production process.

Keywords: Bagasse, activated carbon, syrup decolorization, techno-economic analysis

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป สามารถ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีพลังงานและการแปรรูปเคมีชีวภาพ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการ ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีราภรณ์ ผิวสอาด ประธานกรรมการสอบ และกรรมการ สอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร จันทสี ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของ งานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ หัวหน้าส่วน วิศวกร และพนักงานของ บริษัท น้ำตาลสระบุรี จำกัด ที่สนับสนุน วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง เพื่อน และคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากการวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่ สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

วิฑูรย์ คำชื่น

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ	11
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	11
1.2 วัตถุประสงค์.....	14
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 สารดูดซับ (Adsorbent).....	15
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	15
2.3 การประยุกต์ใช้วัสดุคาร์บอนในการดูดซับในกระบวนการผลิต.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 วัสดุดิบ.....	34
3.2 การคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำ.....	36
3.3 การกำหนดลักษณะของตัวอย่าง.....	37
3.4 การดูดซับค่าสีน้ำเชื่อม.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	39
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัสดุดิบที่ผลิตได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน.....	39
4.2 การวิเคราะห์ทางกายภาพของถ่านกัมมันต์.....	40
4.3 การดูดซับค่าสีน้ำเชื่อม.....	44
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเชื่อม.....	48

สารบัญ (ต่อ)

4.5 การวิเคราะห์เทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ของการผลิตคาร์บอนพูนจากเศษเหลือจาก การผลิตน้ำตาล.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	63
บรรณานุกรม.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ประเภทเป็นผง ตามมอก.900-2547.....	20
ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีถ่านกัมมันต์ประเภทเป็นเม็ด ตาม มอก.900-2547.....	21
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบที่ผลิตได้จากกระบวนการ คาร์บอนเซชัน.....	39
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับ N_2 โดยใช้สมการ Brunauer–Emmett–Teller (BET).....	41
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์การดูดซับค่าสีน้ำเชื่อมของถ่านกัมมันต์.....	45
ตารางที่ 4.4 ข้อมูล UV-VIS และ HPLC.....	49
ตารางที่ 4.5 การทำนายโครงสร้างด้วยเครื่อง MASS SPECTROMETER.....	52
ตารางที่ 4.6 มูลค่าการลงทุนรวมและต้นทุนการซื้ออุปกรณ์.....	54
ตารางที่ 4.7 ตัวชี้วัดศักยภาพเศรษฐกิจและต้นทุนการผลิตรวม.....	56
ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจของกระบวนการนี้กับกระบวนการอื่นๆ....	60

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 แผนภูมิกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาว-รีไฟน์.....	12
รูปที่ 2.1 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถ่ายด้วยSEM[4].....	16
รูปที่ 2.2 ถ่านกัมมันต์จากกากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	17
รูปที่ 2.3 ภาพแสดงถึงโพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์[3].....	17
รูปที่ 2.4 (a) before and (b) after adsorption[5].....	18
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	21
รูปที่ 2.6 พื้นที่วัสดุทางการเกษตร (a),(c),(e) และพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ (b),(d),(f) [12].....	24
รูปที่ 2.7 แผนภาพกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ในการกำจัดไดโคลีฟแนคโซเดียมในน้ำเสีย[14].....	26
รูปที่ 2.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับ 5 รูปแบบ.....	27
รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตถ่านเส้นใยถ่านกัมมันต์ จากถ่านกะลามะพร้าวสำหรับกำจัดสีย้อม[16].....	28
รูปที่ 2.10 แสดงไอโซเทอร์มทั้ง 4 แบบและค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) สูงสุดที่ 0.99 ของ Langmuir ไอโซเทอร์ม[17].....	29
รูปที่ 2.11 วิธีเตรียมถ่านจากเปลือกถั่วในการกำจัดสีแดงคองโก(CR) และ สีเขียวมาลาไคต์(MG) [18].....	30
รูปที่ 2.12 แสดงพื้นที่ผิวของกากกล้วยก่อน(a)หลังการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์(b)[19].....	30
รูปที่ 2.13 แสดงกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์[19].....	31
รูปที่ 2.14 แสดงแนวคิดการออกแบบกระบวนการผลิต Raw Sugar โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (BAC) [21].....	32
รูปที่ 2.15 แสดงการลดสีของน้ำเชื่อม, กากน้ำตาลและสารละลายไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากปืทุท[23].....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.1 วัตถุดิบ: (a) ชานอ้อย (b) กากหม้อกรอง (c) วัสดุผสมชานอ้อยและกากหม้อกรองในอัตราส่วน 3:2.....	34
รูปที่ 3.2 (a) กระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 °C (b) กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700–900 °C.....	35
รูปที่ 4.1 เส้นกราฟไอโซเทิร์มของ BA900, FA900 และCA900.....	42
รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ของคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นที่กำลังขยาย 1,000 เท่า: (a) BA900, (b) FA900 และ (c) CA900.....	44
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของ BA900 และเรซินเชิงพาณิชย์ที่มีน้ำหนักตัวดูดซับที่แตกต่างกัน.....	47
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบภาพตัวอย่างน้ำเชื่อม: (a) น้ำเชื่อมดิบ (b) น้ำเชื่อมหลังจากการดูดซับด้วยเรซิน (c) น้ำเชื่อมหลังจากการดูดซับด้วย BA900.....	48
รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FTIR ของน้ำเชื่อม.....	50
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของน้ำเชื่อม a) Glucose b) Sucrose c) Riboflavin d) Vitexin[24-26].....	51
รูปที่ 4.7 เพอร์เซ็นต์การมีส่วนร่วมของส่วนประกอบต้นทุนแต่ละส่วนต่อต้นทุนการผลิตคาร์บอนรูพรุนทั้งหมด.....	57
รูป 4.8 แผนภูมิกระแสเงินสดสะสมสำหรับการผลิตคาร์บอนรูพรุนจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปน้ำตาลในเวลา (a) สิบปี และ (b) หนึ่งปี (มุมมองจาก Zoomed in).....	59
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในราคาตลาดและต้นทุนการดำเนินงานสำหรับการผลิตคาร์บอนรูพรุน: (a) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (b) ผลตอบแทนจากการลงทุน และ (c) ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย.....	62

บทที่ 1

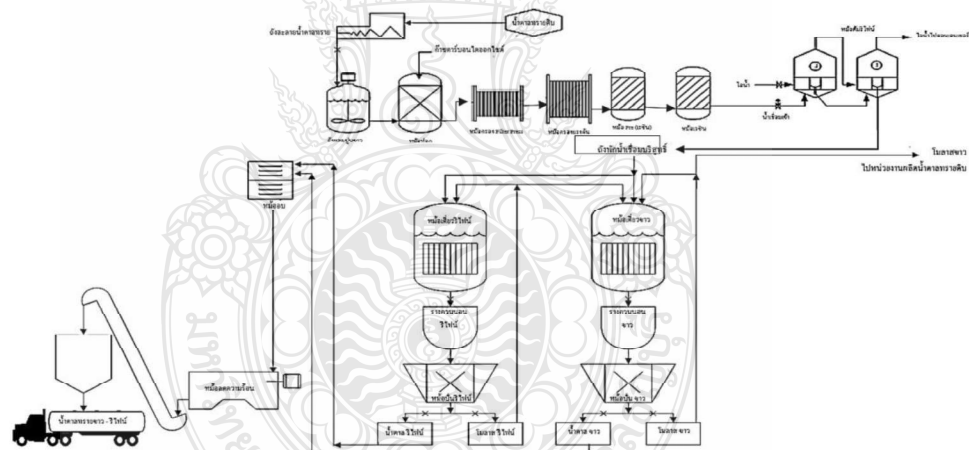
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำตาลถือเป็นวัตถุดิบพื้นฐานที่มนุษย์ใช้เพื่อบริโภคเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุที่น้ำตาลจะเข้าไปเป็นส่วนประกอบของอาหารในทุกประเภท ทำให้ในชีวิตประจำวันล้วนแต่เกี่ยวข้องกับน้ำตาลโดยทั้งสิ้น ซึ่งประเทศไทยถือเป็นภูมิภาคหนึ่งที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาล เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่สามารถปลูกอ้อยได้เป็นอันดับต้น ๆ ของโลก [1] และสามารถส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลออกไปจำหน่ายนอกประเทศได้เป็นจำนวนมากเช่นกัน [2] ส่งผลให้มีปริมาณโรงงานอุตสาหกรรมที่มากเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากเพื่อการผลิตน้ำตาลดังกล่าว อย่างไรก็ตามในกระบวนการแปรรูปอ้อยให้กลายเป็นน้ำตาลนั้นถือเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนที่ต้องผ่านกระบวนการเคมีและด้านวิศวกรรมหลายขั้นตอน ตัวอย่างเช่น การผลิตน้ำตาลทรายขาว (ค่าสีไม่เกิน 200 ICUMSA) ต้องดำเนินการผ่านขั้นตอนเริ่มต้นจากการละลาย (Remelting) น้ำตาลทรายดิบที่ถูกจัดเก็บไว้เพื่อละลายผลึกน้ำตาลให้กลายเป็นน้ำเชื่อมละลาย (Remelted Liquor) จากนั้นจึงกำจัดสิ่งสกปรกโดยการใช้ปูนขาวในหม้อฟอก (Carbonator) และการลดค่าสีของน้ำเชื่อม (Carbonation Process) โดยการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวฟอกสี น้ำเชื่อมที่ผ่านขั้นตอนลดค่าสีแล้วจะผ่านเข้าหม้อกรองแรงดัน (Pressure Filter) เพื่อกรองตะกอนออก และส่งต่อไปยังกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion - Exchange) โดยใช้เรซินเพื่อลดค่าสีขั้นสุดท้ายได้ น้ำเชื่อมในขั้นตอนสุดท้ายนี้ถูกเรียกว่าน้ำเชื่อมรีไฟน์ (Refine Liquor) ซึ่งเป็นน้ำเชื่อมที่พร้อมจะนำไปเข้าสู่กระบวนการตกผลึกให้กลายเป็นน้ำตาลทรายขาวต่อไป ตามรูปที่ 1.1 จากกระบวนการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหากมีการผลิตน้ำตาลทรายขาวมากขึ้นเท่าไรก็ยิ่งส่งผลต่อปริมาณการใช้ปูนขาวและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งในฐานะของโรงงานผู้ผลิตที่ต้องพยายามลดการใช้สารเคมีในกระบวนการแล้วยังต้องหาแนวทางที่จะลดค่าใช้จ่ายในการผลิตอีกด้วย วัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงส่งผลต่อแนวคิดในการลดค่าสีของน้ำเชื่อมโดยการพยายามประยุกต์ใช้กระบวนการและวัสดุที่มีอยู่แล้วในโรงงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัสดุหนึ่งที่มีปริมาณเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากในแต่ละปีจากกระบวนการผลิตน้ำตาลคือกากอ้อย (Bagasse) ซึ่งเหลือจากกระบวนการสกัดน้ำอ้อยคิดเป็นปริมาณ 423,562 ตันต่อปี หรือร้อยละ 30 ของ

ปริมาณอ้อยที่ผ่านเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งโดยปกติแล้วกากอ้อยที่เหลือจากกระบวนการจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเศษไม้เพื่อให้ความร้อนแก่หม้อไอน้ำในการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงาน แต่ก็ยังเหลือปริมาณกากอ้อยที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นอีกเป็นจำนวนมาก แนวทางหนึ่งคือการแปรรูปกากอ้อยให้กลายเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการช่วยฟอกสีหรือดูดซับสีที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเชื่อมละลายและด้วยสาเหตุที่กากอ้อยเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (Cellulosic Material) การแปรรูปกากอ้อยดังกล่าวให้กลายเป็นวัสดุคาร์บอน ได้แก่ ถ่านชีวมวล (Biochar) และ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากโดยคุณสมบัติพื้นฐานแล้ววัสดุพูนที่เรียกว่าถ่านชีวมวลหรือถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้ทั้งในระบบของเหลวและแก๊ส จนบางครั้งถูกเรียกว่าสารดูดซับ แต่ความสามารถในการดูดซับนั้นจะเกิดประสิทธิภาพมากน้อยเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะบ่งชี้ของตัวสารดูดซับเอง เช่น พื้นที่ผิว ขนาดอนุภาค ขนาดรูพรุน และหมู่เคมี เป็นต้น



รูปที่ 1.1 แผนภูมิกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาว-รีไฟน์

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านชีวมวล (Biochar) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จากวัสดุทางการเกษตร ทำให้ผู้วิจัยซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการกระบวนการผลิตน้ำตาลที่มีขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเป็นจำนวนมาก เกิดแนวคิดที่จะทดลองนำวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากกระบวนการได้แก่ ขานอ้อย (Bagasse) และกากหม้อกรอง (Filter cake) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมาทดลองแปรรูปเป็นวัสดุคาร์บอน ในรูปแบบถ่าน กัมมันต์โดย

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ นอกจากนี้ในแนวทางการผลิตถ่านกัมมันต์ดังกล่าว ผู้วิจัยต้องการนำพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งจากหม้อต้มในกระบวนการผลิตมาใช้ร่วมโดยคาดหวังว่ากระบวนการผลิตนี้ นอกจากจะสามารถได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีแล้ว ยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำอีกด้วย โดยตัวแปรที่ผู้วิจัยตั้งใจศึกษาเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่มีได้แก่ ชนิดของชีวมวลจากโรงงานน้ำตาล อัตราการป้อนไอน้ำ และเวลาในการกระตุ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อประเมินศักยภาพของการใช้เป็นวัสดุดูดซับ นอกจากนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ทดสอบการลดค่าสีของน้ำเชื่อมในกระบวนการเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับเสริมจากการใช้เรซินในกระบวนการปกติ โดยการทดสอบการดูดซับค่าสีน้ำเชื่อมจะทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นจะนำไปทดสอบในกระบวนการผลิตเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุทดแทนเรซินต่อไปในอนาคต



1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานน้ำตาล
2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อการลดค่าสีน้ำเชื่อมในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาว
4. เพื่อศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนโดยข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย (BG) กากหม้อกรอง (FC) และของผสมระหว่างขานอ้อยและกากหม้อกรอง (CC) โดยอัตราส่วน (3:2) โดยใช้พลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งจากหม้อต้มไอน้ำในการ Carbonization ทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 60 นาที
2. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุคาร์บอนที่ผลิตได้ ได้แก่ SEM, N₂-Adsorption analyzer และ FTIR
3. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อการลดสีน้ำเชื่อมดิบโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์ผล และพฤติกรรมการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์ม
4. ศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนโดยข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ ที่ได้จากการทำวิจัย โดยมีข้อมูลจากโรงงาน บริษัทน้ำตาลสระบุรี จำกัด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. สารดูดซับ (Adsorbent)

[3] ปริณทร เต็มญารศิลป์, (2008) สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่าง ๆ มาติดผิวได้ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียว, แมกนีเซียมออกไซด์ถ่านกระดูก (bone char) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม

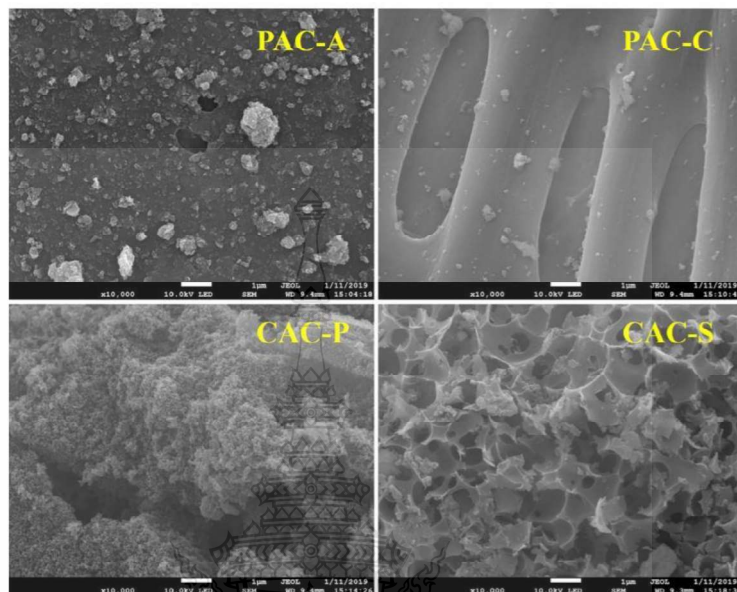
2.1.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารดูดซับได้ดีกว่าสารอนินทรีย์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

2.1.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซิน (Resin) เป็นสารประเภทแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่าตัวดูดซับประเภทต่าง ๆ คือ สามารถปรับคืนสภาพ (regenerate) ได้ง่ายกว่ามาก โดยใช้สารปรับคืนสภาพราคาถูกลง เช่น กรดเกลือ

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

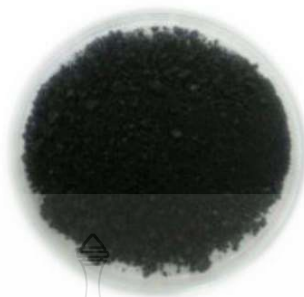
ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal) โดยทั่วไปมันเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่ได้จาก ถ่าน ถูกกระบวนการเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิว สูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนมีสูงมาก เพราะว่ามันมีรูเล็ก ๆ (Micro porosity) จำนวนมาก และสามารถเพิ่มพลังการดูดซับได้อีกโดยใช้สารเคมีปรับสภาพ [4] Chuanwen Zhao et al, (2020) ได้ทำการศึกษาคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากอ้อยใช้สำหรับการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ โดยการใช้วิธีการกระตุ้นการเคมี ด้วย H_3PO_4 (PAC-P), $NaOH$ (PAC-S) และกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยอากาศ (PAC-A), CO_2 (PAC-C) ผลการตรวจสอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วย SEM ที่เตรียมได้ตาม รูปที่ 2 ผลการทดสอบพบว่า การกระตุ้นทางเคมีด้วย $NaOH$ สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ได้ดี

ที่สุด โดยมีพื้นที่ผิวในการดูดซับ 1149 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาณรูพรุนที่ดี 1.73 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม



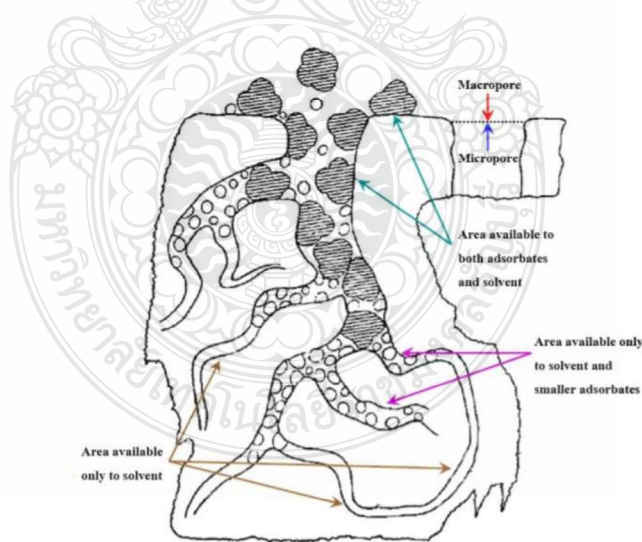
รูปที่ 2.1 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถ่ายด้วย SEM [4]

แอคทีฟคาร์บอน (Active carbon) หรือ แอกทิเวตเตด คาร์บอน (Activated carbon) เป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูงเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและขนาดรูพรุนก็แตกต่างกันตั้งแต่ระดับไมโครเมตร จนถึงระดับนาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์สาร ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้งและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ขี้เลื่อย โดยทำการเผาด้วยความร้อนสูงในสภาวะที่อับอากาศ



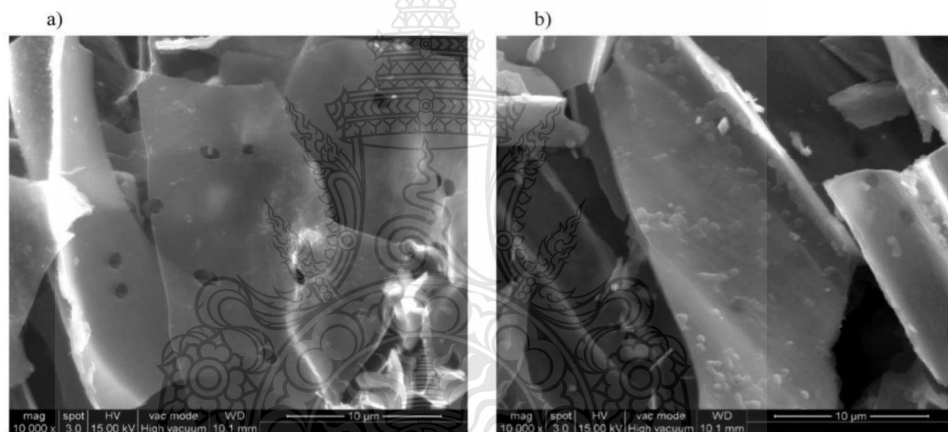
รูปที่ 2.2 ถ่านกัมมันต์จากกากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Activated charcoal หรือ Activated carbon หรือ Activated coal หรือ Activated biochar (the new “green” charcoal) หรือ ถ่านกัมมันต์ ที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งของชั้นกรอง ของ เครื่องฟอกอากาศ และเครื่องกรองน้ำ และอื่น ๆ และรวมถึงเครื่องฟอก ยี่ห้อ AWAC โดยทั่วไปด้วย มันคือ ถ่านผ่านกระบวนการคาร์บอนซ์ โดยการเผาและอัดแรงดันที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นถ่าน ซึ่งมีความพรุนสูงมาก มีการใช้ประโยชน์มากมายหลายด้านสามารถใช้ในการดูดซับสารเคมีต่าง ๆ ได้



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงถึงโพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์ [3]

Activated carbon ถูกนำไปใช้ในการกรองเอาสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการออกจากของเหลวหรือก๊าซ เช่น ในการเตรียมน้ำดื่มบริสุทธิ์ อุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ต้องใช้น้ำบริสุทธิ์ การบำบัดน้ำเสีย ใช้ในการฟอกสีของเหลวต่าง ๆ การทดลองวิจัยในการแยกและเตรียมสารเคมี ทางการแพทย์นำไปใช้ในการกำจัดพิษ การฟอกเลือด และอื่น ๆ ใช้กรองกลิ่นและก๊าซที่ไม่ต้องการในหน้ากากกรองสารพิษและเครื่องฟอกอากาศ [5] Muthamilselvi Ponnuchamy et al, (2020) ได้ทำการวิจัยไบโอชาร์จากขานอ้อยเป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดคลอรีนไฟฟอสที่ปนเปื้อนในน้ำ คลอรีนไฟฟอสเป็นสารเคมีที่ปนเปื้อนมาจากยาฆ่าแมลงและอาจเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำได้ง่าย งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการดูดซับของไบโอชาร์ที่ผลิตขึ้นด้วย Iodine และ เมทิลีนบลู ก่อนการทดสอบการดูดซับคลอรีนไฟฟอสที่ความเข้มข้น 10-500 ppm. พบว่าที่ความเข้มข้นคลอรีนไฟฟอส 10 ppm. สามารถกำจัดคลอรีนไฟฟอสได้ 89%



รูปที่ 2.4 (a) before and (b) after adsorption [5]

2.2.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามเกณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. ทางเคมี (chemical activated carbon) ใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกมีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. ทางฟิสิกส์ (physical activated carbon) ใช้แก๊สออกซิไดส์ มักเป็นพวกมีรูพรุนขนาดเล็ก

แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวคาร์บอน

ก. ขนาดเล็ก (micro pores) มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร (nm) มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (transitional pores or meso-pores) มีรัศมีของรูพรุน 15-100 นาโนเมตร (nm) มักใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ค. ขนาดใหญ่ (macro pores) มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร (nm) มักใช้ในการฟอกสีและผลิตยา

แบ่งตามความหนาแน่น

ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ในสภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบหรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง มักใช้ดูดแก๊สพิษหรือไอระเหย

แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. สำหรับดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่นและไอของสารอินทรีย์ เช่น ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. สำหรับดูดซับสี (color adsorbents) ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านจาวก ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแครบ และถ่านจากกากน้ำตาล

ค. สำหรับดูดซับโลหะ (metal adsorbents) เป็นถ่านที่มีราคาสูงเนื่องจากเป็นตัวยกพวกโลหะ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน และแร่ต่าง ๆ [6] ปัญญา มณีจักร, (2013) ได้ทำการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเพื่อดูดซับ Cr (IV) ไอออน จากน้ำเสีย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ เผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วย KOH อัตราส่วน 1:1 แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง สามารถกำจัด Cr (IV) ต่อ ปริมาณถ่าน เท่ากับ 4.64 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์

เกรดการค้าที่กำจัดได้เพียง 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัม [7] Farshid Ghorbani et al, (2020) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพและการสร้างแบบจำลองของการดูดซับ Cr (VI) ในน้ำ

โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กากของบีทรูท พบว่า ที่ pH 4.05 ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1.49 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของ Cr (VI) 10.13 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาวะเหมาะสมมีประสิทธิภาพในการดูดซับถึง 50.45%

แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

ก. ประเภทเป็นผง (powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลืนในสารละลาย [8] พัทักษ์ อยู่มี,(2015) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากผงถ่านไม้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยใช้ NaOH เป็นตัวกระตุ้น มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างปริมาณผงถ่านไม้กับ NaOH เป็น 1:3 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกระตุ้น 2 ชั่วโมง ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1247 มิลลิกรัมต่อกรัม และ BET เท่ากับ 1214.52 ตารางเมตรต่อกรัม การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีแบบแห้งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย เตรียมง่ายและได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ประเภทเป็นผง ตามมอก.900-2547

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20 - 0.75

ข. ประเภทเป็นเม็ด (pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

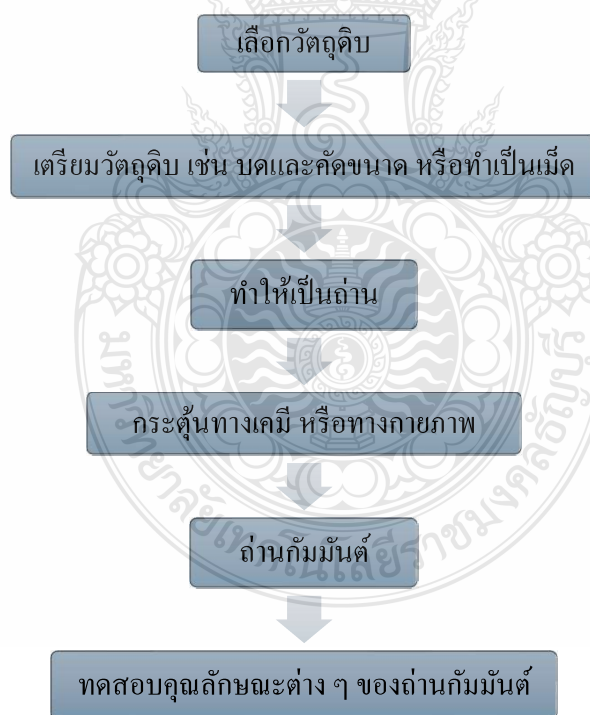
1. Pellet Activated carbon มีรูปร่างขึ้นอยู่กับการอัดผ่านเครื่องอัด
2. Granular Activated carbon มีรูปร่างเป็นเม็ดที่ไม่แน่นอน

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีถ่านกัมมันต์ประเภทเป็นเม็ด ตาม มอก.900-2547

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.36
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

2.2.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing Activated Carbon)

ในปัจจุบันวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.2.3 การเลือกวัตถุดิบ

โดยทั่วไปการเลือกวัตถุดิบ ในการจะนำมาทำถ่านกัมมันต์ จะพิจารณาวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นจำนวนมาก เป็นวัสดุเหลือใช้ตามธรรมชาติและต้องมีปริมาณมากเพียงพอต่อการนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ หรือ มีแนวโน้มว่ามีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดีหากเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านแล้ว [9] Maohong Fan et al,(2007) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟีนอลจากแหล่งน้ำธรรมชาติด้วยถ่านกัมมันต์ ถ่านขานอ้อยและถ่านไม้ โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของฟีนอล 30,50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ถ่านกัมมันต์ ถ่านขานอ้อยและถ่านไม้ เท่ากันที่ 50 กรัมต่อลิตร พบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับฟีนอลได้ 98% ถ่านขานอ้อยสามารถดูดซับฟีนอลได้ 90% และถ่านไม้สามารถดูดซับฟีนอลได้ 90% ซึ่งการดูดซับเป็นไปตาม Freundlich isotherm model จากงานวิจัยนี้พบว่าถ่านขานอ้อยและถ่านไม้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเทียบเท่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

2.2.4 การเตรียมวัตถุดิบ

เมื่อทำการเลือกวัตถุดิบที่จะนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การบด การคัดขนาด หรือทำให้เป็นเม็ด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและให้ง่ายต่อการทำเป็นถ่าน ในขั้นตอนนี้บางวัตถุดิบจำเป็นต้องมีตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ เหมาะสำหรับใช้กับวัตถุดิบที่เป็นผงหรือฝุ่นแล้วทำการอัดเป็นเม็ดต่อไป [10] ทศนีย์ น้อยเลิศ,(2016) ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยทำการบดถ่านให้เป็นผงและอัดขึ้นเม็ดถ่านเป็นรูปทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดเม็ด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้สารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง ในสัดส่วนผลถ่านต่อสารเชื่อมประสานต่อน้ำ คือ 1:0.35:1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเท่ากับ 4 มิลลิเมตร

2.2.5 การทำถ่าน (Carbonization)

Carbonization คือ กรรมวิธีเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความดันของเตาเผาไหม้ เพื่อไล่สารที่ระเหยง่ายและความชื้นที่อยู่ในวัสดุออก Carbonization แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. Carbonization ด้วยอุณหภูมิต่ำ ใช้อุณหภูมิระหว่าง 450-700 องศาเซลเซียส จุดประสงค์หลัก คือ การผลิตเชื้อเพลิงไร้ควัน ใช้ในการหุงต้มและอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นถ่านโค้กชนิดอ่อน

2. Carbonization ด้วยอุณหภูมิต่ำปานกลาง ใช้อุณหภูมิระหว่าง 700-900 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านโค้กอ่อนที่มีสารระเหยน้อยกว่าแบบอุณหภูมิต่ำ ใช้กับอุตสาหกรรมโรงงานที่ใช้กับเตาหม้อต้มโรงงาน

3. Carbonization ด้วยอุณหภูมิสูง ใช้อุณหภูมิระหว่าง 900-1050 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านโค้กแข็ง ใช้กับอุตสาหกรรมถลุงเหล็กและโลหะ

2.2.6 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น คือการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

ก. วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

เป็นการเปลี่ยนวัตถุดิบโดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น [11] สัมพันธ์ สร้อยกล่อมและคณะ, (2017) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดเพื่อกำจัดโลหะหนัก โดยใช้การกระตุ้นทางเคมีด้วย H_3PO_4 ใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที แล้วทำการแช่กรด H_3PO_4 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 v/v เป็นเวลา 180 นาที โดยใช้เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่วและโครเมียม เทียบเท่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ข้อดี คือ วิธีนี้ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก ประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการกระตุ้นน้อย ข้อเสีย คือ ในบางครั้งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นวิธีนี้อาจพบปัญหาเรื่องสารเคมีตกค้างภายในตัวของถ่านกัมมันต์

ข. วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

เป็นการนำถ่านที่ผ่านการเผาไหม้ในสภาพบรรยากาศ มาทำการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) ร่วมกับการใช้ความร้อน [12] Johannes Hansie Knoetze et al, (2012) ได้ทำการศึกษาการไฟโรไลซิสแบบสูญญากาศ

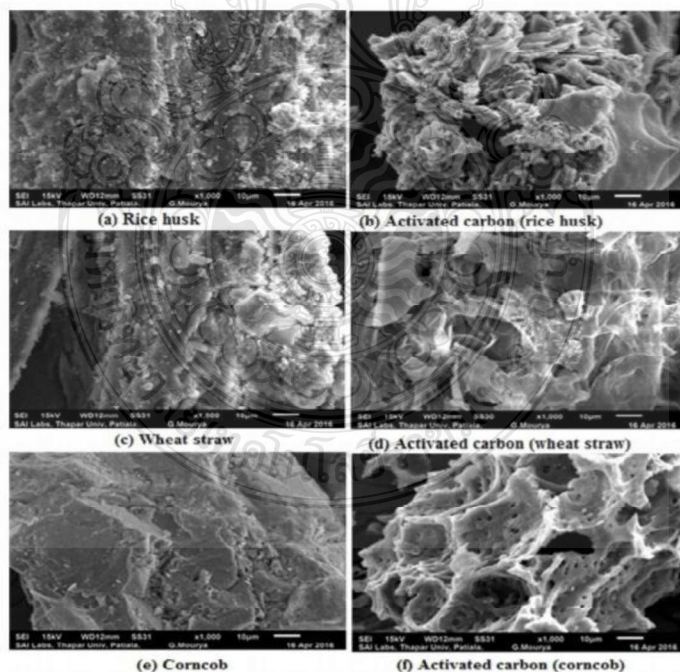
โดยใช้กากอ้อยแอฟริกาใต้และลักษณะจำเพาะของถ่านกัมมันต์และไบโอชาร์ โดยทำการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ความดัน 8 kPa และอัตราการให้อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วทำการศึกษาพื้นที่ผิวด้วย N₂-BET มีค่าเท่ากับ 418 ตารางเมตร ต ' อ ก ร ั ม

ดูโครงสร้างของ รูพรุน meso-macropore และผล FT-IR พบว่าบริเวณพื้นที่ผิวมีประจุเป็นลบ ข้อดีคือ ไม่มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการกระตุ้นนาน

2.2.7 การทดสอบคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

2.2.7.1 ลักษณะพื้นผิว (surface characteristics) เมื่อทำการผลิตถ่านกัมมันต์

สิ่งแรกที่งานวิจัยต่าง ๆ จะต้องทำการพิจารณาเป็นลำดับแรก คือ พื้นที่ผิวหลังจากการถูกกระตุ้น [13] Bharadwaj Adiraju et al, (2017) ได้ทำการใช้ SEM (Scanning electron microscopy) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุตั้งต้น (raw materials) และถ่านกัมมันต์หลังจากการกระตุ้น เพื่อดูพื้นที่ผิวของตัวอย่าง



รูปที่ 2.6 พื้นผิววัสดุจากการเกษตร (a), (c), (e) และพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ (b), (d), (f) [1

2.2.7.2 ไอโอดีนนัมเบอร์ (iodine) เป็นค่าสำคัญที่ใช้บอกประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ และเป็นตัวบ่งชี้พื้นที่ผิวทั้งหมด โดยการดูดซับ iodine จากสารละลายเทียบกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จำนวน มิลลิกรัมของ iodine ที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย iodine หลังถูกดูดซับเป็น 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

2.2.7.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าความหนาแน่นสูงจะเป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับได้ดี

2.2.7.4 ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (particle size distribution) ถ่านที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากก็จะมีพื้นที่ผิวของถ่านให้มากขึ้น ทำให้โมเลกุลก๊าซถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างถ่านได้เร็วขึ้น

2.2.7.5 ค่าความแข็ง (hardness/abrasion number) เป็นค่าความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ ค่านี้จะบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสีและความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง โดยค่าความแข็งนี้ จะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนตามวัตถุดิบและระดับที่ถ่านถูกกระตุ้น

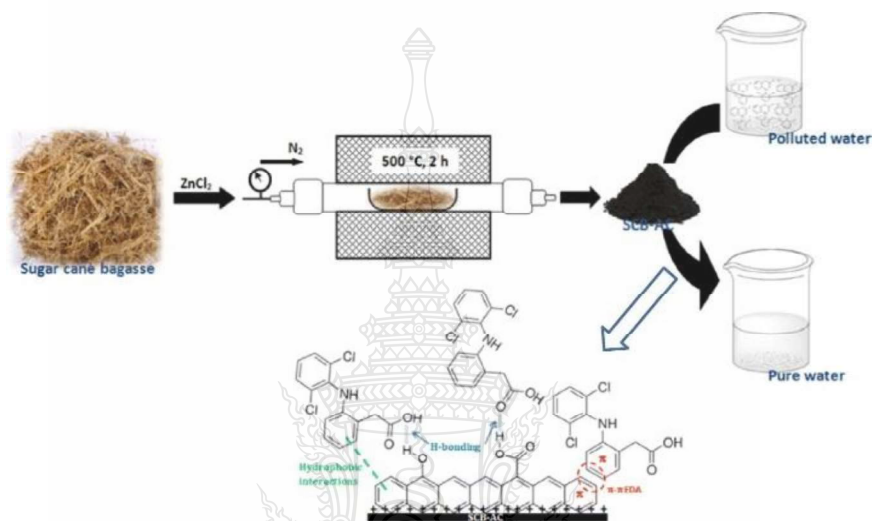
2.2.7.6 ปริมาณเถ้า (ash content) หากปริมาณเถ้ามากประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จะลดลงและทำให้ลดประสิทธิภาพการนำถ่านไปกระตุ้นซ้ำ

2.2.7.7 เมทิลีนบลู (methylene blue) ถ่านกัมมันต์ที่โครงสร้างมีรูพรุนจะดูดซับโมเลกุลขนาดกลาง เช่น สีย้อม เมทิลีนบลู สารที่ให้สีนี้ถูกใช้เป็นตัวแทนของที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ค่าเมทิลีนบลูมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

2.2.8 การฟื้นฟูประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

เมื่อถ่านถูกใช้งานไปนาน ๆ รูพรุนของถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรก ทำให้ถ่านมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด จะต้องนำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ (exhausted carbon) มาฟื้นฟูคุณภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานได้ อีก การฟื้นฟูคุณภาพทำได้โดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่าน ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี [14] Ahmed O. Abo El Naga et al,(2019)

ได้ทำการศึกษาวิธีการกำจัดไดโคลฟีแนคโซเดียมในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้ ZnCl_2 เป็นสารเคมีที่กระตุ้นให้เกิดถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1145 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาณรูพรุน 1.13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีความสามารถในการดูดซับสูงถึง 92.4% และสามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไดโคลฟีแนคโซเดียมโดยใช้อะซิโตน

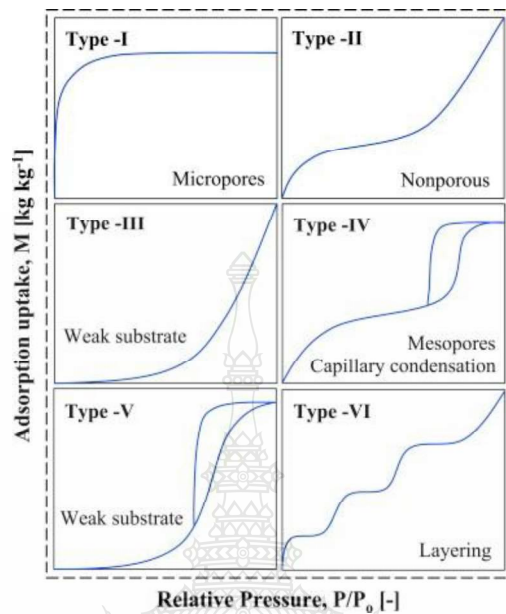


รูปที่ 2.7 แผนภาพกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ในการกำจัดไดโคลฟีแนคโซเดียมในน้ำเสีย[14]

2.3 การประยุกต์ใช้วัสดุคาร์บอนในการดูดซับในกระบวนการผลิต

2.3.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ในสภาวะสมดุลระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ อุณหภูมิคงที่ เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาเขียนเป็นกราฟ จะได้เส้นแนวโน้มที่ เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ รูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับสามารถอธิบายลักษณะของกระบวนการดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบ่งเป็น 5 รูปแบบดังนี้



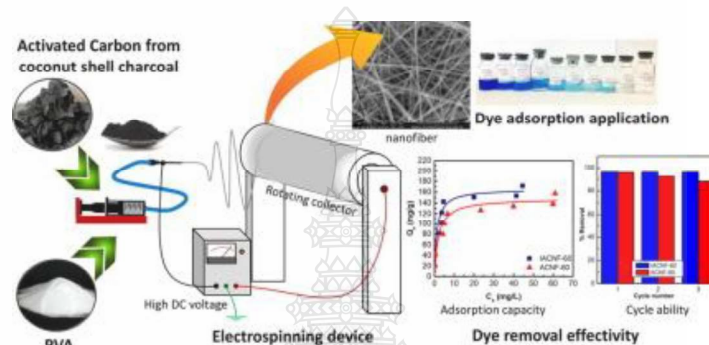
รูปที่ 2.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับ 5 รูปแบบ

จากรูปที่ 2.8 จะพบว่า Type-I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer absorption) หรือเรียกว่า Langmuir isotherm เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดเพียงเล็กน้อย [15] S. Venkata Mohan and J. Karthikeyan, (1997) ได้ทำการศึกษากำจัดสีของ lignin และ tannin ผลการทดสอบพบว่าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบ monolayer บนพื้นผิวดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกันตามแบบ Langmuir adsorption isotherm โมเลกุลของตัวดูดซับ lignin และ tannin ส่วนใหญ่จับกับพื้นผิวดูดซับแบบ chemisorption interaction และมีการสร้างพันธะที่แข็งแรงเกิดขึ้นด้วย

2.3.2 แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm)

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ได้นำมาใช้อธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับ โดยมีสมมติฐานของสมการ คือ ทุกตำแหน่งดูดซับ(adsorption site) ต้องมีลักษณะเหมือนกัน (homogeneous), การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้น ๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว(monolayer) [16] W. Widiyastuti et al, (2020) ได้ทำการศึกษาเส้นใยถ่านกัมมันต์ nanofibers จากถ่านกะลามะพร้าวสำหรับการกำจัดสีย้อม ได้ทำการทดสอบดูดซับ

สารละลายเมทิลีนบลู พบว่ามีการดูดซับสูงสุดแบบ monolayer ที่ 166.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังคงประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ 96% สำหรับการกำจัดสีสามรอบ, ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ, พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุก ๆ พื้นที่ของการดูดซับและโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตถ่านเส้นใยถ่านกัมมันต์ จากถ่านกะลามะพร้าวสำหรับกำจัดสีย้อม [16]

[17] Sara Ansari et al,(2012) ทำการศึกษาการกำจัดสีเข้มของน้ำเชื่อมอินทผลัมด้วยถ่านกัมมันต์ โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (30,40,50 และ 60 องศาเซลเซียส) และความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ (0.04,0.06,0.08,0.1 และ 0.12 กรัมต่อมิลลิลิตร) ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Tempkin และ Harkins – Jura จากผลทดสอบพบว่ารูปแบบการดูดซับไอโซเทอรัมของ Langmuir มีค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) สูงสุดที่ 0.99 ถ่านกัมมันต์นี้มีการดูดซับ monolayer absorption สามารถกำจัดสารประกอบสีได้สูงสุด 95% ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

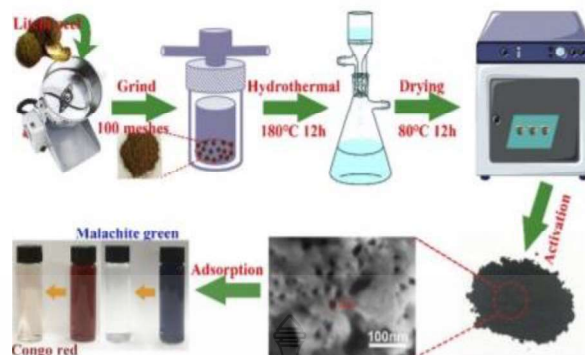
Estimated Langmuir, Freundlich, Tempkin and Harkins-Jura constants with their fitting quality parameters (RMSE and R^2) at 30, 40, 50 and 60 °C.

		Temperature (°C)			
		60	50	40	30
Langmuir	K_L (ml/mg)	5.407	11.427	14.142	15.125
	Q_m (mg/g)	43.824	32.216	27.952	25.081
	R_L	0.056	0.027	0.022	0.021
	R^2	0.992	0.998	0.999	0.999
	RMSE	1.25E-3	9.69E-4	7.66E-4	9.19E-4
Freundlich	K_f (ml/mg)	36.669	29.094	25.993	23.645
	$1/n$	0.215	0.109	0.064	0.034
	R^2	0.997	0.979	0.951	0.895
	RMSE	0.012	0.017	0.014	0.010
Tempkin	K_T	2.2338E + 2	1.6259E + 4	9.0684E + 6	6.6247E + 12
	B_T	6.803	3.007	1.624	0.801
	R^2	0.985	0.981	0.956	0.891
	RMSE	0.873	0.427	0.327	0.229
Harkins-Jura	A	2214.787	3408.863	4980.806	8203.218
	B	1.666	4.068	7.400	14.688
	R^2	0.991	0.964	0.940	0.902
	RMSE	4.646E-5	5.870E-5	4.739E-5	3.295E-5

รูปที่ 2.10 แสดงไอโซเทอรัมทั้ง 4 แบบและค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) สูงสุดที่ 0.99 ของ Langmuir ไอโซเทอรัม [17]

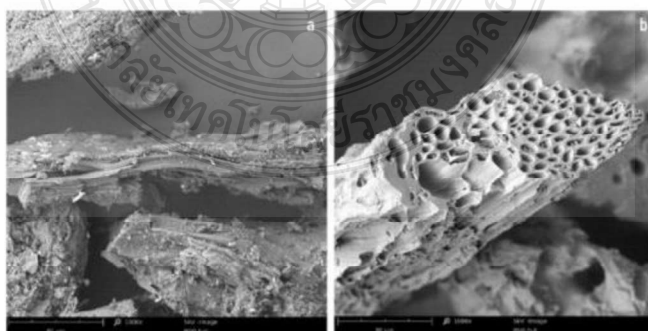
2.3.3 ประโยชน์ของตัวดูดซับในการดูดซับค่าสีของสารละลาย

การนำวัสดุที่เป็นตัวดูดซับไปใช้อย่างแพร่หลาย คือ การใช้เป็นตัวดูดซับค่าสีของสารละลาย เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การบำบัดสีของน้ำเสียในโรงงาน อุตสาหกรรมสีย้อม [18] Baofeng Lin et al,(2020) ได้ทำการศึกษาการใช้ถ่านจากเปลือกถั่วลิสงในการกำจัดสีแดงคองโก(CR) และ สีเขียวมาลาไคต์(MG) ผลการทดสอบพบว่าถ่านเปลือกถั่วลิสงมีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ 1006 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.588 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีความจุในการดูดซับสีของ CR และ MG อยู่ที่ 404.4 และ 2468 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นถ่านเปลือกถั่วลิสงมีความสามารถเป็นตัวดูดซับ เพื่อกำจัดสี CR และ MG จากสารละลายในน้ำได้

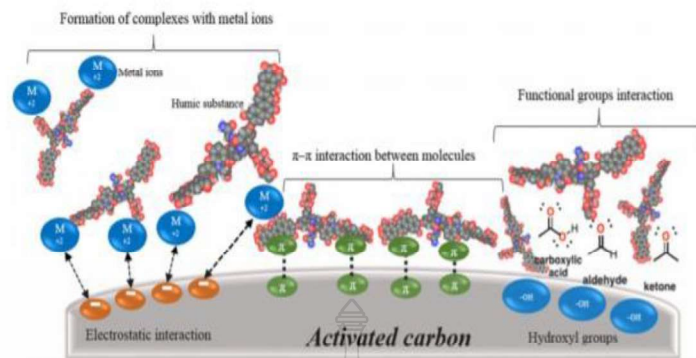


รูปที่ 2.11 วิธีเตรียมถ่านจากเปลือกถั่วลิสงในการกำจัดสีแดงคองโก(CR) และ สีเขียวมาลาไคต์(MG) [18]

[19] Zaidi Ab Ghani et al,(2017) ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกล้วย เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดค่าสีและCOD ของน้ำเสียจากขยะฝั่กล้วย โดยทำการศึกษา 3 ปัจจัยที่เกี่ยวกับพื้นที่ผิว คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น, เวลาในการกระตุ้นและอัตราส่วนของตัวกระตุ้นต่อปริมาณถ่าน โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้น ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้น คือ 761 องศาเซลเซียส, เวลาในการกระตุ้น คือ 87 นาทีและอัตราส่วนของตัวกระตุ้นต่อปริมาณถ่าน คือ 4.5 กรัมต่อกรัม โดยค่าร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 27% ค่า iodine number 1101 มิลลิกรัมต่อกรัม, การกำจัดสี 91.2% และการกำจัดCOD ได้ 83.0% ทำการทดสอบพื้นที่ผิว BET มีค่าเท่ากับ 1329.5 ตารางเมตรต่อกรัม, มีปริมาณรูพรุน 1.16 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 3.8 นาโนเมตร ซึ่งลักษณะการเกิดรูพรุนที่เหมาะสมกับการดูดซับสารพิษในน้ำเสียขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.12 แสดงพื้นที่ผิวของกากกล้วยก่อน(a)หลังการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์(b) [19]

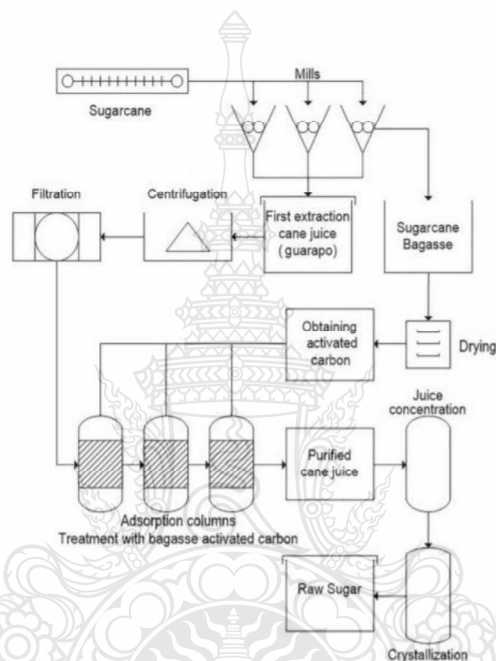


รูปที่ 2.13 แสดงกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [19]

2.3.4 การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อลดค่าสีของน้ำเชื่อมในกระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตน้ำตาลขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ขั้นตอนการเตรียมน้ำเชื่อม เนื่องจากหากน้ำเชื่อมมีคุณภาพที่ดี มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เหมาะสม จะทำให้ได้น้ำตาลที่มีคุณภาพ ในขั้นตอนการเตรียมน้ำเชื่อมจะประกอบด้วยกระบวนการบำบัดเพื่อความสะดวกและความบริสุทธิ์ของน้ำเชื่อม โดยมีปัจจัย ที่มีผลต่อกระบวนการเตรียมน้ำเชื่อม คือ ค่าสีน้ำเชื่อม, ความขุ่น, ค่าความชื้น %Brix และ pH ของน้ำเชื่อม [20] P. Laksameethanasan et al,(2012) ทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำเชื่อมจากน้ำอ้อย โดยทำการวิเคราะห์ความขุ่น, สี, pH และการประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่าการใส่ปูนขาวให้ถึง pH 7 แล้วเติมเบนโทไนท์ที่ 3% (w/w) ช่วยลดความขุ่นของน้ำเชื่อมได้ดี และการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ 0.3% (w/w) หลังจากปรับค่า pH 7 และเบนโทไนท์ 3% การเพิ่มขึ้นของปริมาณถ่านกัมมันต์ทำให้ความขุ่นและสีลดลง หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนจนมีค่าความชื้นที่ 68 %Brix ปูนขาวมีส่วนทำให้ปริมาณซูโครสสูงขึ้น แต่ปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสต่ำกว่าการเติมเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการย่อยสลายน้ำตาล จะเห็นว่าน้ำเชื่อมที่ผ่านการบำบัดด้วยเบนโทไนท์ 3% และถ่านกัมมันต์ 0.3% ให้กระบวนการบำบัดที่ดีที่สุดในเรื่องของสีและคุณภาพทางประสาทสัมผัส การทดสอบกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ จะใช้วิธีการจำลองสภาวะหรือกระบวนการผลิตเป็นแบบ laboratory scale เพื่อให้ทราบถึงผลการทดสอบที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำเชื่อม [21] María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa et al,(2019) ทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ

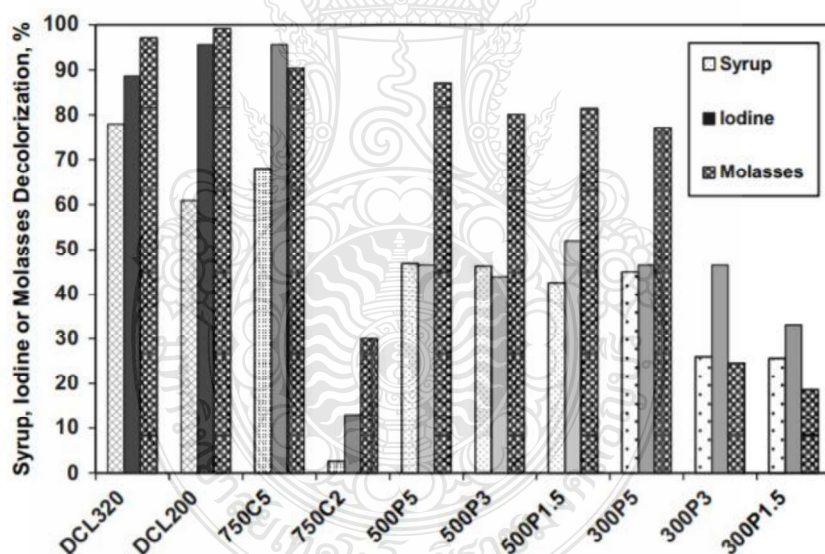
โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากอ้อย (BAC) เป็นตัวบำบัดน้ำเชื่อมดิบก่อนการทำเป็นน้ำตาลทรายดิบ ในระดับ laboratory scale น้ำเชื่อมดิบที่ผ่านการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลที่ผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม พบว่าBAC สามารถกำจัดสีของน้ำเชื่อมดิบได้มากถึง 98% ผลึกน้ำตาลอ้อย Raw Sugar ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำตาลที่ผลิตจากกระบวนการผลิตปกติของโรงงาน



รูปที่ 2.14 แสดงแนวคิดการออกแบบกระบวนการผลิต Raw Sugar โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (BAC) [21]

อย่างไรก็ตามการนำกากอ้อยเป็นวัสดุตั้งต้นในการทำเป็นตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ จำเป็นจะต้องทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้เพื่อให้คุ้มค่าและประโยชน์ในการใช้งานสูงสุด [22] Y.Satyawali and M.Balakrishnan,(2007) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีจากโรงกลั่นชีวภาพ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กากอ้อย, ชีเลื่อย, ชีเถ่าถ่านไม้และชีเถ่าแกลบ เพื่อนำมาใช้ในการกำจัดค่าสีของน้ำเสียจากโรงกลั่นชีวภาพ ถ่านกากอ้อยที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 สามารถกำจัดสีได้สูงสุดที่ 50% แต่ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้มากกว่า 80% [23] N.S. Kincal et al, (2008) ทำการศึกษาการลดสีน้ำเชื่อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์และ

ถ่านกัมมันต์จากหัวบีท ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ คือ DCL320 (วัสดุไม้, กระตุ้นด้วย phosphoric acid) และ DCL200 (วัสดุถ่านหิน, กระตุ้นด้วยไอน้ำ) ทำการเตรียมตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากบีทรูทที่แตกต่างกัน 8 ตัวอย่าง โดยการอัดคาร์บอนโดยตรงและการกระตุ้นที่ 750 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมงหรือ 5 ชั่วโมง (750C2, 750C5) เตรียมตัวอย่างอีกหกตัวอย่าง โดยการชุบด้วยกรดฟอสฟอริกครั้งแรกเป็นเวลาข้ามคืน และทำการกระตุ้นโดยไนโตรเจนที่ 300 องศาเซลเซียส หรือ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5-5 ชั่วโมง (300P1.5, 300P3, 300P5 , 500P1.5, 500P3, 500P5) จากผลการทดสอบการลดสีของน้ำเชื่อม, กากน้ำตาลและสารละลายไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากบีทรูท พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากบีทรูทที่กระตุ้นที่ 750 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง 750C5 มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ทั้งสองตัวอย่าง



รูปที่ 2.15 แสดงการลดสีของน้ำเชื่อม, กากน้ำตาลและสารละลายไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากบีทรูท [23]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. วัตถุดิบ

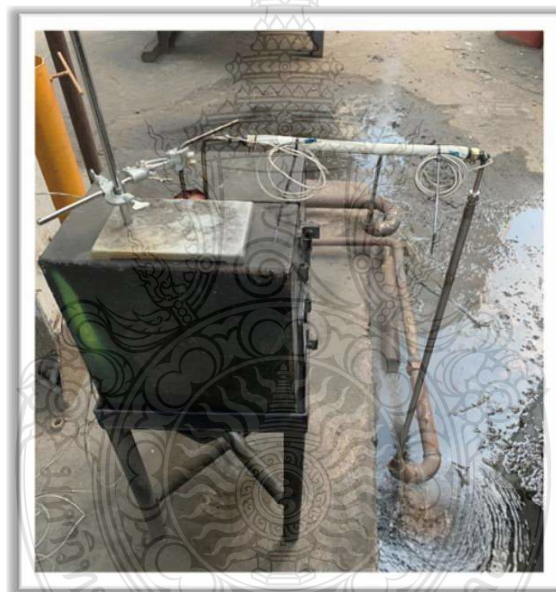
กากอ้อย กากกรอง และสารประกอบของกากอ้อยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษาครั้งนี้ จัดหาโดย บริษัท น้ำตาลสระบุรี จำกัด ประเทศไทย ก่อนการอัดเม็ด ขนาดของอนุภาคของวัสดุทั้งหมดจะถูกปรับมาตรฐานให้น้อยกว่า 2 mm. สารประกอบถูกเตรียม โดยการผสมกากอ้อยและกากหม้อกรองในอัตราส่วน 3:2 โดยน้ำหนัก ซึ่งระบุว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดตามการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 3.1 วัตถุดิบ: (a) ชานอ้อยอัดเม็ด (b) กากหม้อกรองอัดเม็ด (c) วัสดุผสมชานอ้อยและกากหม้อกรองในอัตราส่วน 3:2 อัดเม็ด



(a)



(b)

รูปที่ 3.2 (a) กระบวนการคาร์บอนไชน์ที่อุณหภูมิ 500 °C

(b) กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700–900 °C

การทดลองเหล่านี้ได้ประเมินอัตราส่วนระหว่างชานอ้อยกับกากหม้อกรองต่างๆ สำหรับการสร้างคอมโพสิตอัตราส่วนที่มีปริมาณชานอ้อยต่ำทำให้ได้คอมโพสิตที่ขาดความสมบูรณ์ของโครงสร้างระหว่างการอัดเม็ด ซึ่งอาจเกิดจากการยึดเกาะและความแข็งแรงเชิงกลไม่เพียงพอ ในทางกลับกัน

การเพิ่มอัตราส่วนขานอ้อยเกิน 3:2 จะทำให้การมีส่วนสนับสนุนการทำงานของกากหม้อกรองลดลง ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของรุกรุน ดังนั้น อัตราส่วน 3:2 จึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้เกิดความสมดุลที่เหมาะสมที่สุดระหว่างความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ปริมาณคาร์บอน และการพัฒนารุกรุน โดยเน้นย้ำถึงความจำเป็นของการปรับอัตราส่วนวัสดุให้เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้การใช้งานและประสิทธิภาพการทำงาน ตามที่แสดงใน รูปที่ 3.1 วัสดุทั้งสามชนิดถูกอัดด้วยสกรูให้เป็นเม็ดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10.0 มม. และความยาวประมาณ 20.0 มม. เม็ดเหล่านี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการแปลงทางเคมีความร้อนเพื่อผลิตคาร์บอนที่มีรุกรุนในภายหลัง

3.2. การคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันดำเนินการภายในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์สเตนเลสสตีลที่หุ้มฉนวนเพื่อให้มีประสิทธิภาพทางความร้อน เพื่อบรรจุวัสดุแต่ละชนิด (ขานอ้อย กากหม้อกรอง และคอมโพสิต) 500 กรัม เครื่องปฏิกรณ์ถูกแขวนไว้บนตัวเก็บเก็ล้าของเครื่องทำความร้อนแบบตะแกรงโซ่ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2 a ความร้อนส่วนเกินในห้องเก็บเก็ล้าโดยทั่วไปจะรักษาอุณหภูมิไว้ประมาณ 500 ± 50 °C อุณหภูมินี้ถูกเลือกสำหรับการคาร์บอนไนเซชันเนื่องจากเป็นจุดสมดุลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้โครงสร้างคาร์บอนมีเสถียรภาพและมีปริมาณคาร์บอนคงที่สูง อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันที่ต่ำลงอาจนำไปสู่การสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจทำให้เกิดการกราดไฟมากเกินไป ส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุและความสามารถในการดูดซับลดลง เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุจะถูกแปลงเป็นไบโอชาร์อย่างสมบูรณ์ จึงใช้เวลา 2 ชั่วโมงในการคาร์บอนไนเซชัน ไบโอชาร์ที่ได้จะถูกระบุเป็น BC, FC และ CC ซึ่งสอดคล้องกับคาร์บอนจากขานอ้อย คาร์บอนจากแผ่นกรอง และคาร์บอนคอมโพสิต ตามลำดับ หลังจากคาร์บอนไนเซชันแล้ว ไบโอชาร์จะถูกทำให้ร้อนด้วยไอน้ำเพื่อเพิ่มรุกรุน กระบวนการกระตุ้นใช้ไอน้ำส่วนเกินจากหม้อไอน้ำและได้รับการสนับสนุนจากเตาไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 b การกระตุ้นดำเนินการที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าช่วยส่งเสริมการพัฒนารุกรุนอย่างมีประสิทธิภาพ ที่อุณหภูมิ 700 °C การทำให้เป็นก๊าซบางส่วนจะเริ่มสร้างรุกรุน ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิเป็น 800 °C และ 900 °C จะช่วยส่งเสริมการพัฒนารุกรุนเพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่เกิน 900 °C อาจทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพและรุกรุนยุบตัวเนื่องจากการทำงานมากเกินไป ในระหว่าง

กระบวนการเปิดใช้งาน ใอน้ำจะถูกบ้อนเข้าสู่อัตราการเลือกเพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะการพาภายใน เครื่องปฏิกรณ์ตัวอย่างคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกติดตามวัสดุตั้งต้นดังต่อไปนี้: คาร์บอนที่ถูกกระตุ้นจากชานอ้อย (BA) คาร์บอนที่ถูกกระตุ้นจากเค้กกรอง (FA) และคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นแบบผสม (CA) หมายเลข 700, 800 และ 900 ที่แนบท้ายฉลากเหล่านี้ระบุอุณหภูมิในการเปิดใช้งานที่ใช้ ตัวอย่างเช่น BA700 หมายถึงคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นจากชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 °C

3.3. การกำหนดลักษณะของตัวอย่าง

องค์ประกอบทางกายภาพของวัตถุดิบและคาร์บอนกัมมันต์ (BC, FC และ CC) ได้รับการประเมินโดยใช้การวิเคราะห์โดยประมาณ (ASTM D7582) วิธีนี้กำหนดปริมาณคาร์บอนคงที่ สารระเหย ปริมาณเถ้า และระดับความชื้นในแต่ละตัวอย่าง เพื่อประเมินองค์ประกอบธาตุ การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายดำเนินการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ CHNS-O โดยวัดปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ของตัวอย่าง การวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายมาตรฐาน (ASTM D5373) ซึ่งรับประกันความน่าเชื่อถือและความแม่นยำสูงในการวัด คุณสมบัติเชิงเนื้อสัมผัสของคาร์บอนกัมมันต์ ได้รับการกำหนดลักษณะตามพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดซับ ก๊าซอัตโนมัติ (Quanta Chrome AUTOSORB IQ-Station 1) การวิเคราะห์นี้ใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับ-การดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 196 °C ก่อนการวัด จะมีการใส่ก๊าซออกประมาณ 0.2 กรัมของแต่ละตัวอย่างภายใต้ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ดูดซับออกไป พื้นที่ผิวจำเพาะคำนวณโดยใช้วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ในขณะที่ใช้สมการ Dubinin-Radushkevich (DR) เพื่อประมาณปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด กำหนดจากการดูดซับไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์สูงสุด ($P/P_0 = 0.99$) สันฐานวิทยาของคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นได้รับการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM 7800F ซึ่งให้ภาพความละเอียดสูง เพื่อประเมินลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน

3.4 การดูดซับค่าสีในน้ำเชื่อม

เราเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเชื่อมดิบ จาก บริษัทน้ำตาลสระบุรี จำกัด และเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ทดแทนเรซินสังเคราะห์ทั่วไป

เราทดสอบถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 กรัมโดยเติมลงในภาชนะขนาด 30 มล. ที่บรรจุน้ำเชื่อมดิบ จากนั้นคนส่วนผสมด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้เกิดความสมดุล จากนั้นจึงวัดปริมาณสีของน้ำเชื่อมโดยใช้เครื่องตรวจวัดสเปกตรัม UV-Visible รุ่น Genesis 30 (Thermo Scientific) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตรและค่า pH 7 เราประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยใช้หน่วย ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณน้ำตาลและสีของผลิตภัณฑ์ การวัดการฟอกสีปฏิบัติตามวิธี ICUMSA GS7-21 และแสดงเป็นหน่วย ICUMSA (IU) คำนวณโดยใช้สมการ (3.1):

$$IU = \frac{10^8 \times \text{Abs}}{b \times \text{Brix} \times \rho} \quad (3.1)$$

โดยที่ Abs คือค่าการดูดกลืนแสง b คือความยาวของคิวเวตต์ (cm.) ปริกซ์คือเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำตาล และ ρ คือความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (kg./m^3) เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสีคำนวณโดยใช้สมการ (3.2):

$$\% \text{ decolorization} = \frac{IU_i - IU_a}{IU_i} \quad (3.2)$$

โดยที่ IU_i คือดัชนีสีเริ่มต้นของน้ำเชื่อม และ IU_a คือดัชนีสีที่ดูดกลืนของน้ำเชื่อม

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบที่ผลิตได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบและไบโอชาร์ที่ผลิตได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้รับการประเมินตามที่แสดงใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 Proximate และ Ultimate analysis ของตัวอย่าง

กระบวนการ	ตัวอย่าง	Proximate analysis (% dry basis)			
		ความชื้น	ปริมาณสารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
วัสดุ	ชานอ้อย	51.33	40.58	5.42	2.67
	กากหม้อกรอง	76.81	9.72	8.25	5.22
	คอมโพสิต	55.98	33.18	6.28	4.56
คาร์บอนไนเซชัน	BC	1.88	1.01	96.22	0.89
	FC	1.39	0.97	96.74	0.90
	CC	2.04	1.01	96.07	0.88

กระบวนการ	ตัวอย่าง	Ultimate analysis (% dry basis)			
		ไฮโดรเจน	คาร์บอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
วัสดุ	ชานอ้อย	5.32	42.58	0.37	51.73
	กากหม้อกรอง	4.78	37.97	0.39	56.86
	คอมโพสิต	5.55	42.35	0.35	51.75
คาร์บอนไนเซชัน	BC	2.31	77.50	14.37	5.82
	FC	2.89	78.43	11.94	6.74
	CC	2.66	77.21	14.45	5.68

การวิเคราะห์หัตถ์วัตถุโดยประมาณระบุว่าปริมาณคาร์บอนคงที่อยู่ในช่วง 5.42 ถึง 8.25% ในขณะที่ปริมาณความชื้นสูงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในเค้กรอง เนื่องจากคาร์บอนคงที่เป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนารูพรุนของวัสดุ จึงใช้กระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้นอย่างมีนัยสำคัญและปรับโครงสร้างคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ หลังจากกระบวนการคาร์บอนเซชัน ปริมาณคาร์บอนคงที่ในไบโอชาร์ทั้งหมด (BC, FC และ CC) จะเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นประมาณ 96% จากผลการทดลองนี้การแปลงนี้ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยอยู่ในช่วง 77.21 ถึง 78.43% โดยน้ำหนัก

4.2. ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

หลังจากกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ วัสดุที่ถูกเผาด้วยคาร์บอนจะถูกแปลงเป็นตัวอย่างคาร์บอนที่ถูกกระตุ้น ซึ่งเรียกว่า BA, FA และ CA วัสดุเหล่านี้ถูกระบุลักษณะโดยใช้การวิเคราะห์การดูดซับ N_2 และสรุปผลในตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้รับโดยใช้สมการ Brunauer–Emmett–Teller (BET) เผยให้เห็นแนวโน้มที่สำคัญในพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิการกระตุ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างอุณหภูมิการกระตุ้นกับทั้งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการพัฒนารูพรุนที่เกิดจากความร้อน เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มขึ้น สารประกอบระเหยจะถูกกำจัดออกอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสร้างช่องว่างเพิ่มเติมและเพิ่มความพรุน ในบรรดาตัวอย่างที่เปิดใช้งาน BA900 มีพื้นที่ผิวสูงสุด ($366.32 \text{ m}^2/\text{g}$) และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ($0.105 \text{ cm}^3/\text{g}$) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนในช่วง 2.16–2.51 นาโนเมตร ขนาดรูพรุนนี้จัดอยู่ในประเภทตัวอย่าง BA เป็นวัสดุที่มีรูพรุนระดับกลาง ซึ่งเหมาะสมเป็นพิเศษสำหรับการดูดซับและการใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และมีขนาดรูพรุนปานกลาง อย่างไรก็ตาม FA มีพื้นที่ผิวดำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($27.54\text{--}41.07 \text{ m}^2/\text{g}$) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนใหญ่กว่าเล็กน้อย (3.06–3.10 นาโนเมตร) พื้นที่ผิวที่ลดลงอาจเกิดจากองค์ประกอบที่ซับซ้อนและไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเค้ก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชานอ้อยมีเซลลูโลสประมาณ 440.40 กรัม/กก. เมื่อเทียบกับ 171.70 กรัม/กก. ในกากหม้อกรอง ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณเถ้าที่สูงในเค้กรองอาจขัดขวางการพัฒนา รูพรุนโดยเข้าไปอยู่ในช่องว่างหรือปิดกั้นการเข้าถึงของไอน้ำไปยังโครงสร้างภายในในระหว่างการกระตุ้น

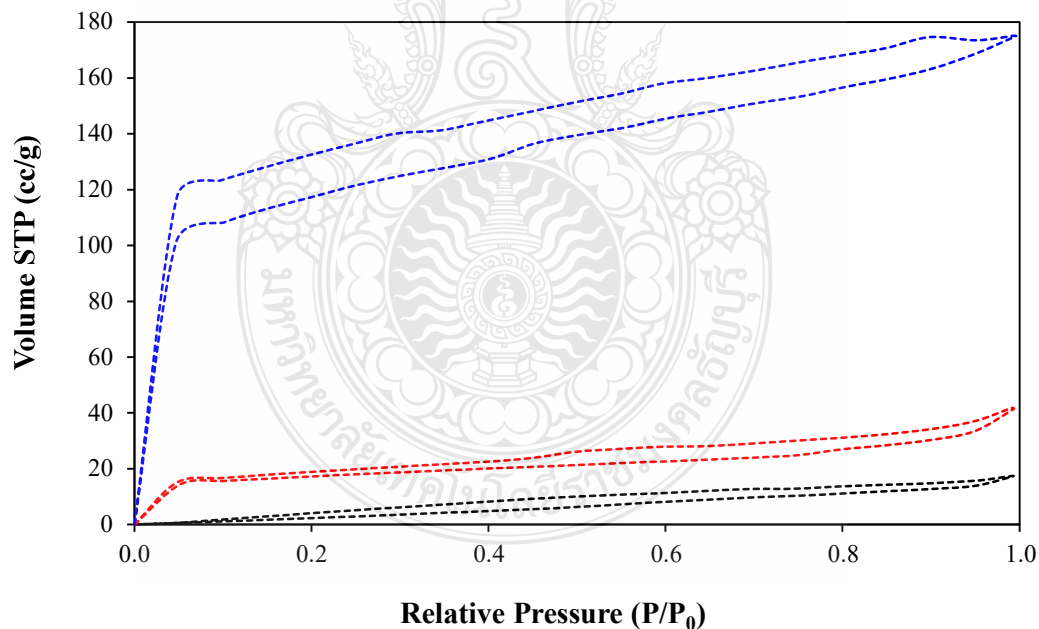
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับ N₂ โดยใช้สมการ Brunauer–Emmett–Teller (BET)

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาณรูพรุนทั้งหมด (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (นาโนเมตร)
BA700	160.10	0.012	2.16
BA800	212.31	0.046	2.23
BA900	366.32	0.105	2.51
FA700	27.54	0.060	3.10
FA800	29.75	0.032	3.06
FA900	41.07	0.041	3.06
CA700	10.64	0.021	3.59
CA800	16.13	0.027	3.84
CA900	16.98	0.028	3.42

CA แสดงพื้นที่ผิวที่เล็กที่สุด (10.64–16.98 m²/g) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด (3.42–3.84 นาโนเมตร) ลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุคอมโพสิตอาจส่งผลให้คุณสมบัติเหล่านี้ไม่เหมาะสมที่สุด ความแตกต่างในเสถียรภาพทางความร้อนของกากหม้อกรองและส่วนประกอบของขาน ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอในคอมโพสิตสามารถขัดขวางการกระตุ้นที่สม่ำเสมอและการพัฒนารูพรุนที่ตามมา ผลลัพธ์เน้นย้ำถึงความท้าทายที่เกี่ยวข้องกับการใช้เค้กกรองและวัสดุคอมโพสิตในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ แม้ว่า BA900 จะเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มมากที่สุด โดยมีพื้นที่ผิวที่มีพื้นที่มากที่สุดและโครงสร้างที่มีรูพรุนปานกลางซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับและการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ตัวอย่าง FA และ CA ยังต้องการการปรับปรุงเพิ่มเติม กลยุทธ์ต่างๆ เช่น การบำบัดล่วงหน้าเพื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสหรือการใช้สารเคมีกระตุ้นอาจจำเป็นต่อการปรับปรุงพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของวัสดุเหล่านี้ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มศักยภาพในการดูดซับ

กราฟไอโซเทิร์มการดูดซับ-การดูดซับ N₂ ของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ได้รับการวิเคราะห์เพื่อประเมินโครงสร้างที่มีรูพรุน โดยแสดงผลลัพธ์เป็นความดันสัมพันธ์ (P/P₀) เทียบกับปริมาตรการดูดซับไนโตรเจน (cm³/g) ในรูปที่ 4.1 เส้นกราฟไอโซเทิร์มของ BA900 แสดงโปรไฟล์ประเภท IV แบบ

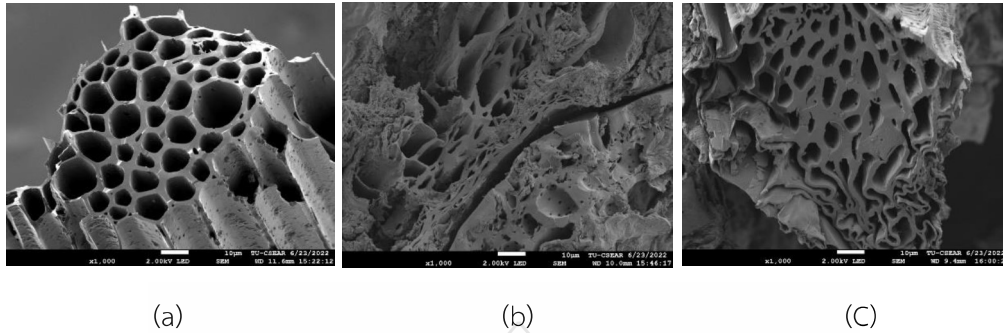
คลาสสิก ตามที่กำหนดโดยการจำแนกประเภท IUPAC ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง BA900 มีพื้นที่ผิวสูงถึง 366.32 m²/g และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนตั้งแต่ 2.16 ถึง 2.51 นาโนเมตร ซึ่งยืนยันการจำแนกประเภทเป็นเมโสพอร์ส คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ BA900 เหมาะเป็นพิเศษสำหรับการดูดซับและการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และเมโสพอร์สที่เชื่อมต่อกันช่วยให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลและการแพร่กระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพ FA900 ยังแสดงให้เห็นไอโซเทิร์มประเภท IV ที่มีลูปฮิสเทอรีซิสปานกลาง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการดูดซับไนโตรเจนและพื้นที่ผิวต่ำกว่า BA900 อย่างมีนัยสำคัญ ลูปฮิสเทอรีซิสประเภท H3 ใน FA900 แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของเมโสพอร์ที่มีลักษณะคล้ายช่อง แต่เมโสพอร์เหล่านี้ยังพัฒนาไม่เต็มที่และไม่สม่ำเสมอ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ระหว่าง 3.06 ถึง 3.10 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าของ BA900 แต่เครือข่ายโดยรวมขาดความหนาแน่นและความสม่ำเสมอ ในขณะที่ CA900 แสดงปริมาณการดูดซับไนโตรเจนและพื้นที่ผิวที่ต่ำที่สุดในบรรดาตัวอย่าง ความเสถียรทางความร้อนที่แตกต่างกันของส่วนประกอบของขานอ้อยและกากหม้อกรองทำให้เกิดการสลายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้โครงสร้างที่มีรูพรุนไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.1 เส้นกราฟไอโซเทิร์มของ BA900, FA900 และ CA900

ลูบิสเทอริซิสประเภท H4 ที่สังเกตพบใน CA900 ซึ่งมีลักษณะเฉพาะคือมีขนาดเล็กกว่าและมีลักษณะเด่นชัดน้อยกว่า ช่วยสนับสนุนแนวคิดที่ว่ารูพรุนของลูบนี้ไม่ได้พัฒนาเต็มที่หรือแยกออกจากกัน การไม่มีรูพรุนขนาดกลางที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนนี้จำกัดความสามารถในการดูดซับของวัสดุอย่างมาก และจำกัดศักยภาพในการใช้งานในพื้นที่ที่ต้องการพื้นที่ผิวสูงและโครงสร้างรูพรุนที่สม่ำเสมอ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นได้รับการตรวจสอบโดยใช้ SEM ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 ความแตกต่างของโครงสร้างรูพรุนในตัวอย่างต่างๆ เกิดจากองค์ประกอบที่แตกต่างกันของวัตถุดิบและการตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ รูปที่ 4.2a แสดงภาพ SEM ของ BA900 ซึ่งแสดงโครงสร้างรูพรุนที่พัฒนาอย่างดีโดยมีรูปร่างและขนาดรูพรุนที่หลากหลาย โครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมต่อกันที่สังเกตได้นั้นสอดคล้องกับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจำนวนมากที่กำหนดในการวิเคราะห์ BET การกระจายที่สม่ำเสมอและการเข้าถึงรูพรุนใน BA900 ช่วยเพิ่มความสามารถในการโต้ตอบกับสารดูดซับหลากหลายชนิด ซึ่งสนับสนุนการใช้งานในกระบวนการที่ต้องการความสามารถในการดูดซับสูง FA900 (รูปที่ 4.2b) มีสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่หนาแน่นกว่าและเป็นระเบียบน้อยกว่า โดยมีรูพรุนคล้ายช่องและขนาดรูพรุนที่ผิดปกติอย่างมีนัยสำคัญ ลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นเนื้อเดียวกันอาจส่งผลต่อการสร้างรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอนี้ในระหว่างการกระตุ้น ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันนี้สอดคล้องกับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ต่ำกว่าที่สังเกตพบ ในการวิเคราะห์ BET แม้ว่า FA900 อาจไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการรูพรุนสูง แต่รูพรุนรูปช่องที่ใหญ่กว่านั้นบ่งชี้ถึงศักยภาพในการดูดซับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่เลือกสรรภาพ SEM ของ CA900 ที่แสดงในรูปที่ 4.2c เผยให้เห็นถึงสัณฐานวิทยาลูกผสมที่ผสมผสานลักษณะของทั้งขานอ้อยและกากหม้อกรอง โครงสร้างแบบผสมนี้มีลักษณะเด่นคือส่วนผสมของบริเวณที่มีรูพรุน ซึ่งคล้ายกับขานอ้อยร่วมกับบริเวณที่หนาแน่นกว่าและมีรูพรุนน้อยกว่าซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกากหม้อกรอง เครือข่ายรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่าและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าที่รายงานในการวิเคราะห์ BET แม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ใหญ่กว่าของ CA900 อาจเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานที่ต้องการรูพรุนขนาดใหญ่ แต่ประสิทธิภาพโดยรวมของ CA900 ในกระบวนการดูดซับอาจถูกจำกัดเนื่องจากการกระจายรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ของคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นที่กำลังขยาย 1,000 เท่า: (a) BA900, (b) FA900 และ (c) CA900

4.3. การดูดซับค่าสีในน้ำเชื่อม

การประยุกต์ใช้จริงของการศึกษาครั้งนี้คือ ศักยภาพในการทดแทนเรซินสังเคราะห์ราคาแพงแบบเดิมด้วยวัสดุจากสารตกค้างในอุตสาหกรรมน้ำตาลสำหรับการกำจัดสีในน้ำเชื่อม วัสดุที่ได้จากสารตกค้างเหล่านี้เป็นวิธีแก้ปัญหาที่คุ้มต้นทุนและส่งเสริมความยั่งยืนด้วยการเปลี่ยนผลพลอยได้ทางการเกษตร เช่น ชานอ้อยและกากหม้อกรอง ให้กลายเป็นทรัพยากรที่มีค่า แนวทางนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดขยะเท่านั้น แต่ยังสอดคล้องกับหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนอีกด้วย โดยใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้จำนวนมากที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตน้ำตาลเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อประเมินประสิทธิภาพ ได้มีการดำเนินการทดลองการดูดซับแบบแบตช์ โดยใช้วัสดุพูนที่เตรียมไว้ 0.5 กรัมกับน้ำเชื่อมดิบ 30 มล. น้ำเชื่อมดิบที่ได้จากโรงงานน้ำตาลมีความเข้มข้นของสีเริ่มต้น (IU) ที่ 633 ± 5 IU ผลการกำจัดสีแสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

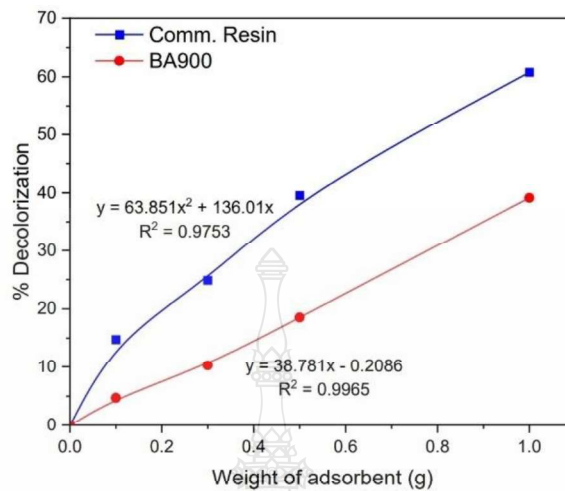
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์การดูดซับค่าสีน้ำเชื่อมของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ค่าสี (IU _a)	% การลดค่าสี
BA700	592	6.48
BA800	561	11.37
BA900	500	21.01
FA700	631	0.32
FA800	634	0.00
FA900	629	0.63
CA700	614	3.00
CA800	612	3.32
CA900	601	5.06

BA900 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดที่ 21.01% เมื่อน้ำหนักตัวอย่าง 0.5 กรัม ประสิทธิภาพดังกล่าวเกิดจากโครงสร้างเมโสพอร์สที่พัฒนาอย่างดี ซึ่งเห็นได้จากพื้นผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้มีไซต์ที่ใช้งานได้หลายไซต์สำหรับการดูดซับสี ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการดูดซับสีที่ได้รับการปรับปรุงนั้นสอดคล้องกับหลักการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับที่เหนือกว่าของ BA900 เน้นย้ำถึงความเหมาะสมในทางปฏิบัติสำหรับการดูดซับสีในกระบวนการแปรรูปน้ำเชื่อมในอุตสาหกรรม FA900 มีประสิทธิภาพการดูดซับสีที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยทำได้เพียง 0.63% ที่น่าสนใจคือ ประสิทธิภาพนี้ต่ำกว่าของวัสดุคอมโพสิต CA900 ด้วยซ้ำ ซึ่งทำได้การดูดซับสี 5.06% แม้จะมีพื้นที่ผิวที่เล็กกว่า ความแตกต่างนี้บ่งชี้ว่าพื้นผิวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำหนดประสิทธิภาพการดูดซับได้ ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดของ FA900 อาจเกิดจากองค์ประกอบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเค้กกรอง ซึ่งรวมถึงสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ดินเหนียว ซิลิกา และสารมลพิษอื่นๆ สิ่งเจือปนเหล่านี้ขัดขวางการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่มีประสิทธิภาพระหว่างการกระตุ้นและลดจำนวนไซต์ที่ใช้งานได้สำหรับการดูดซับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นในสัญญาณวิทยา

ที่ไม่สม่ำเสมอที่สังเกตได้ในการวิเคราะห์ SEM สันฐานวิทยาที่ไม่สม่ำเสมอนี้ทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและสีไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากรูพรุนจำนวนมากอาจไม่สามารถเข้าถึงได้หรือไม่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่สม่ำเสมอใน CA900 ช่วยให้เข้าถึงได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ทั้ง CA900 และ FA900 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ BA900 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยทั้งด้านองค์ประกอบและโครงสร้าง ปริมาณเซลล์โลสที่ต่ำกว่าในกากหม้อกรองเมื่อเทียบกับกากอ้อยจำกัดศักยภาพในการสร้างโครงสร้างคาร์บอนที่มีรูพรุน ดังนั้น วัสดุคอมโพสิตจึงมีข้อจำกัดบางส่วนเหล่านี้มาจากส่วนประกอบของกากหม้อกรอง

ประสิทธิภาพการลดสีของ BA900 และเรซินเชิงพาณิชย์ได้รับการประเมินโดยการเปลี่ยนน้ำหนักตัวดูดซับจาก 0.1 ถึง 1.0 g. ในน้ำเชื่อมดิบ 30 ml. ผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.3 เผยให้เห็นพฤติกรรมดูดซับที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุทั้งสอง เรซินเชิงพาณิชย์แสดงแนวโน้มการดูดซับแบบพหุนาม ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ซึ่งอธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน ตามด้วยการดูดซับแบบหลายชั้นเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว พฤติกรรมนี้เน้นให้เห็นโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กที่ปรับแต่งอย่างดีของเรซิน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและอำนวยความสะดวกในการโต้ตอบแบบหลายชั้นอย่างแข็งแกร่งที่น้ำหนักตัวดูดซับที่สูงขึ้น กลไกการดูดซับของเรซินเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นหลัก ทำให้มีปฏิสัมพันธ์ที่มีประสิทธิภาพและคัดเลือกได้มากกว่ากับสารเคมีที่ทำให้เกิดสีในน้ำเชื่อม เมื่อเทียบกับกลไกการดูดซับทางกายภาพ ในขณะที่ BA900 แสดงแนวโน้มการดูดซับเชิงเส้น ซึ่งบ่งบอกถึงไอโซเทิร์มของฟรันทิช ซึ่งอธิบายการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยมีพลังงานการดูดซับที่แตกต่างกัน รูปแบบนี้สะท้อนให้เห็นโครงสร้างเมโสพอร์สและแมโครพอร์สของ BA900 ซึ่งการดูดซับจะเกิดขึ้นตามสัดส่วนตลอดช่วงน้ำหนักที่ทดสอบโดยไม่มีความอิ่มตัวที่ชัดเจน โครงสร้างเมโสพอร์สของ BA900 มีบทบาทสำคัญในพฤติกรรมการดูดซับ โดยให้พื้นที่ผิวที่สำคัญสำหรับการดูดซับทางกายภาพ แม้ว่าจะไม่มีฟังก์ชันการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินก็ตาม



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของ BA900 และเรซินเชิงพาณิชย์ที่มีน้ำหนักตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

ด้วยน้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 g. BA900 สามารถกำจัดสีในน้ำเชื่อมได้ 38.57% ในขณะที่เรซินเชิงพาณิชย์ทำได้ 72.16% ผลลัพธ์เหล่านี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของพื้นที่ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (ขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2.00 นาโนเมตร) และกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนในการบรรลุประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นจุดแข็งที่สำคัญของเรซินเชิงพาณิชย์ แม้ว่าเรซินเชิงพาณิชย์จะมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่า แต่ช่องว่างระหว่างประสิทธิภาพระหว่างเรซินและ BA900 จะลดลงเมื่อน้ำหนักตัวดูดซับเพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้บ่งชี้ว่า BA900 สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้ด้วยการเพิ่มปริมาณ เรซินแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าเมื่อพิจารณาจากน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ข้อได้เปรียบนี้มาพร้อมกับต้นทุนที่สูงขึ้นอย่างมาก BA900 ซึ่งได้มาจากวัสดุเหลือใช้และพลังงานจากกระบวนการผลิตน้ำตาล ถือเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและยั่งยืนกว่ามาก การเปรียบเทียบทางสายตาของการทำให้สีของน้ำเชื่อมจางลงจะแสดงในรูปที่ 4.4 โดยน้ำเชื่อมที่ดูดซับแล้วที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน (รูปที่ 4.4b) ปรากฏว่าโปร่งใสกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการลดสีที่สูงขึ้น น้ำเชื่อมที่ผ่านการบำบัดด้วย BA900 (รูปที่ 4.4c) ยังคงมีสีเข้มกว่าเล็กน้อยแต่ยังคงแสดงการลดสีอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับน้ำเชื่อมดิบ (รูปที่ 4.4a) ประสิทธิภาพในการลดสีที่พอเหมาะของ BA900 ทำให้เป็นวัสดุทางเลือกหรือวัสดุเสริมที่มีแนวโน้มดีสำหรับเรซิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาจากกระบวนการผลิตที่ยั่งยืน BA900 ผลิตขึ้นโดยใช้ความร้อนและไอน้ำจากกระบวนการผลิต นอกจากนี้ BA900 อาจใช้เป็นวัสดุดูดซับล่วงหน้าก่อนใช้เรซินในการทำให้สีของน้ำเชื่อมจางลง ซึ่งจะช่วยลดภาระของเรซินและยืดอายุการใช้งานได้ กลยุทธ์นี้จะไม่

เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการฟอกสีเท่านั้น แต่ยังช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเรซินปกติอีกด้วย โดยการรวม BA900 เข้ากับเรซิน อุตสาหกรรมสามารถบรรลุวิธีการฟอกสีไคร์บที่คุ้มต้นทุนและยั่งยืนยิ่งขึ้น ขณะเดียวกันก็รักษาประสิทธิภาพสูงและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการวิจัยเน้นย้ำถึงศักยภาพของ BA900 ในฐานะวิธีการฟอกสีไคร์บที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและคุ้มต้นทุน เมื่อใช้ร่วมกับหรือเป็นอาหารเสริมเรซินเชิงพาณิชย์ BA900 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการดูดซับสีได้ กระบวนการผลิตที่ยั่งยืนซึ่งใช้ความร้อนและไอน้ำเหลือทิ้งนั้นเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการลดปริมาณคาร์บอนในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้ แนวทางแบบคู่ขนานนี้ไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมเท่านั้น แต่ยังสอดคล้องกับเป้าหมายความยั่งยืนในการใช้งานในอุตสาหกรรมอีกด้วย



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบภาพตัวอย่างน้ำเชื่อม: (a) น้ำเชื่อมดิบ (b) น้ำเชื่อมหลังจากการดูดซับด้วยเรซิน (c) น้ำเชื่อมหลังจากการดูดซับด้วย BA900

4.4 การวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเชื่อม

ผลการทดสอบ HPLC ในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักในน้ำเชื่อมดิบ RS (a) คือซูโครสประมาณ 53.08% ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลของ $C_{12}H_{22}O_{11}$ และองค์ประกอบอื่นๆ ประมาณ 47% อาจเป็นสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำเชื่อม ดังที่แสดงในตารางที่ 4.4 การดูดซับน้ำเชื่อมโดยเรซินและ BA900 ไม่มีผลต่อการลดซูโครส แต่มีผลต่อการเปลี่ยนสี เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์นี้ได้ดีขึ้น

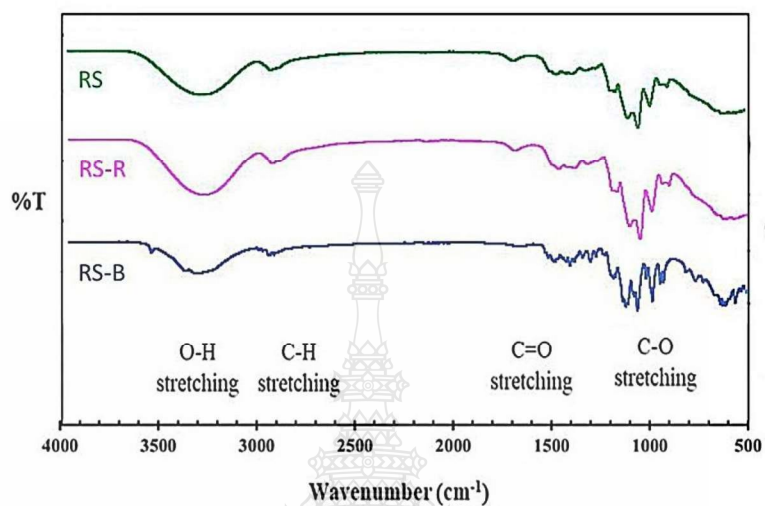
จึงได้ตรวจสอบน้ำเชื่อมที่ดูดซับโดยเรซินและ BA900 โดยใช้สเปกโตรสโคปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์
ทรานส์ฟอร์ม

ตารางที่ 4.4 ข้อมูล UV-VIS และ HPLC



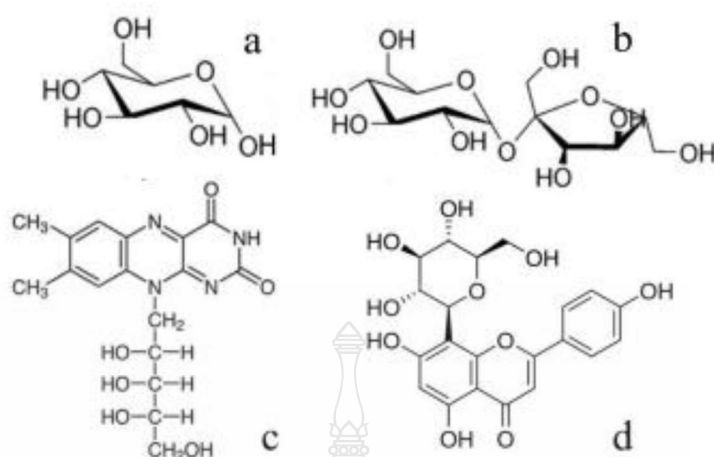
ตัวอย่าง	UV-VIS			HPLC	
	ความเข้มข้น (%)	ค่าสี (IU)	pH	Glucose (% wt.)	Sucrose (% wt.)
RS	54.77	369	7.89	0.58	53.08
RS-R	54.47	108	7.55	0.00	53.01
RS-B	54.97	153	5.99	0.58	53.08

(FTIR) และแมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม FTIR ของน้ำเชื่อมสามชนิด ได้แก่ น้ำเชื่อมดิบ RS (a) น้ำเชื่อมดิบที่ดูดซับด้วยเรซิน RS-R (b) และน้ำเชื่อมดิบที่ดูดซับด้วย BAC RS-B (c)



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FTIR ของน้ำเชื่อม

ผลลัพธ์เหล่านี้ได้รับการยืนยันด้วยสเปกตรัม FTIR ของ RS ซึ่งแสดงกลุ่มฟังก์ชันหลักเป็นกลุ่มไฮดรอกซี (การยืดตัวแบบ O-H) ที่ความยาวคลื่น $3,300\text{ cm}^{-1}$, ไฮโดรคาร์บอนในรูปแบบการยืดตัวแบบ C-H ที่ $2,900\text{ cm}^{-1}$, กลุ่มคาร์บอนิล (การยืดตัวแบบ C=O) ที่ $1,700\text{ cm}^{-1}$ และกลุ่มคีโตน (การยืดตัวแบบ C-O) ที่ $1,000\text{ cm}^{-1}$ การดูดซับด้วยเรซินและ BA900 ทำให้กลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ปรากฏว่าน้ำเชื่อมที่ดูดซับด้วย BA900 (RS-B) มีกลุ่มไฮดรอกซี (O-H) ลดลง ส่งผลให้มีความเป็นกรดสูงกว่า RS และ RS-R จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าผลการตรวจด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) แสดงให้เห็นองค์ประกอบของสารหลัก 4 ชนิด ได้แก่ กลูโคสและซูโครส รวมถึงไรโบฟลาวินและวิตามินซี ซึ่งไม่สามารถตรวจพบด้วย HPLC



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของน้ำเชื่อม a) Glucose b) Sucrose c) Riboflavin d) Vitexin [24-26]

วิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์น้ำเชื่อมวิธีหนึ่งคือเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มวล [27] ผลที่ได้จาก MS ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้โหมดช่วงลบโดยการระบุมวลโมเลกุลและแสดงเป็นตารางในตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาเผยให้เห็นว่า BA900 สามารถดูดซับโมเลกุลกลูโคสได้เล็กน้อย ทำให้ความอุดมสมบูรณ์สัมพัทธ์ (% RA) ของ RS-B ลดลงเหลือ 50% จาก 55% เดิม ในขณะที่ RS-R อยู่ที่ 20% หลังจากดูดซับด้วยเรซิน % RA ของซูโครสที่ระบุโดย RS-R อยู่ที่ 20% ซึ่งขัดแย้งกับผล UV-vis ซึ่งระบุเปอร์เซ็นต์ปริมาณที่ ซูโครสและไรโบฟลาวินอาจมีโครงสร้างโมเลกุลที่คล้ายกันเนื่องจากมวลโมเลกุลอยู่ในช่วงแคบเดียวกัน คือ ระหว่าง 341 ถึง 376 ซึ่งอาจทำให้การจำแนกสารทั้งสองชนิดมีความซับซ้อน ไรโบฟลาวินเป็นวิตามินบี 2 ชนิดหนึ่งที่ดูเหมือนจะมีประโยชน์ต่อเซลล์ของมนุษย์และเป็นส่วนประกอบหนึ่งของน้ำเชื่อม อย่างไรก็ตาม Vitexin ซึ่งเป็นโมเลกุลต้านอนุมูลอิสระและอนุพันธ์ของกลูโคส [24] ก็ถูกตรวจพบเช่นกัน การวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า Vitexin เป็นสารที่มีคุณค่าและสกัดมาจากพืช [28] อย่างไรก็ตามองค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสุดในน้ำเชื่อม (432 กรัมต่อโมล) และด้วยเหตุนี้จึงมีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่ที่สุด (รูปที่ 6d) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Vitexin จาก RS ลดลงจาก 100 เป็น 70% เมื่อวัดโดย RS-B และลดลงอีกเป็น 22% เมื่อวัดโดย RS-R ปริมาณของ Vitexin ดูเหมือนจะค่อนข้างสอดคล้องกับดัชนีสีและการทดลองการดูดซับ

ตารางที่ 4.5 การทำนายโครงสร้างด้วยเครื่อง MASS SPECTROMETER

ตัวอย่าง	Relative Abundance (%)			
	Glucose	Sucrose	Riboflavin	Vitexin
	(M.W.=180)	(M.W.=341)	(M.W.=376)	(M.W.=432)
RS	55	100	60	100
RS-R	20	20	100	22
RS-B	50	100	100	70



4.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิตวัสดุคาร์บอนจากของเสียของกระบวนการผลิตน้ำตาล

จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ทางเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินผลกำไรจากการผลิตคาร์บอนที่มีรูปพูนจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการผลิตน้ำตาล การวิเคราะห์นี้พิจารณาถึงการลงทุนคงที่และต้นทุนการดำเนินงานทั้งหมดในการคำนวณต้นทุนโดยรวม สมมติฐานสำหรับการลงทุนคงที่และต้นทุนการดำเนินงานทั้งหมดมีดังนี้ โรงงานดำเนินการ 3 ระยะ ละ 8 ชั่วโมงต่อวันเป็นเวลา 210 วันทำงานต่อปี กากอ้อยและกากกรองมีราคา 332.4 บาทต่อตัน [29] และคาร์บอนที่มีรูปพูนที่ได้มีราคาจะอยู่ที่ 55,368.2 บาทต่อตัน อัตราผลตอบแทนที่น่าดึงดูดใจขั้นต่ำคือ 7% อายุโครงการคือ 10 ปี โดยไม่พิจารณาถึงมูลค่าซาก

4.5.1. การประมาณต้นทุนการลงทุนทั้งหมด

การประมาณต้นทุนการลงทุนทั้งหมดและต้นทุนอุปกรณ์ที่ซื้อสำหรับการผลิตคาร์บอนพูนเชิงทดลองจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปน้ำตาลมีรายละเอียดอยู่ในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงการลงทุนทั้งหมดซึ่งได้รับอิทธิพลจากหลายหมวดหมู่ [30] การกำหนดขนาดอุปกรณ์ได้รับการออกแบบและประมาณตามกำลังการผลิตคาร์บอนพูนต่อปี เครื่องอัดสกรูเป็นต้นทุนอุปกรณ์หลัก โดยต้นทุนโมดูลเปล่า (BMC) จำนวนเป็น 238,652.8 บาท ต้นทุนนี้ใช้เป็นพื้นฐานในการประมาณค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

ตารางที่ 4.6 มูลค่าการลงทุนรวมและต้นทุนการซื้ออุปกรณ์

คำอธิบาย		ค่าใช้จ่าย (บาท)
อัปเดตยอดรวม BMC	ชุดอุปกรณ์สกรูอัดเม็ด	238,652.8
ค่าจัดซื้ออุปกรณ์และค่าขนส่ง	10% ของยอดรวม BMC ที่อัปเดต	23,866.7
ค่าติดตั้งอุปกรณ์	80% ของยอดรวมการส่งมอบอุปกรณ์ที่ซื้อ	19,090.5
เครื่องมือวัดและระบบควบคุม	26% ของยอดรวมการส่งมอบอุปกรณ์ที่ซื้อ	6,203.7
ระบบท่อน้ำ	80% ของยอดรวมการส่งมอบอุปกรณ์ที่ซื้อ	19,090.5
ระบบไฟฟ้า	15% ของยอดรวมการส่งมอบอุปกรณ์ที่ซื้อ	3,579.5
อาคารสถานที่	6% ของยอดรวมการส่งมอบอุปกรณ์ที่ซื้อ	1,431.1
ปรับปรุงสถานที่	10% ของยอดรวมการส่งมอบอุปกรณ์ที่ซื้อ	2,386.3
สิ่งอำนวยความสะดวกในการบริการ	30% ของยอดรวม BMC ที่อัปเดต	71,596.5
ที่ดิน	4% ของยอดรวม BMC ที่อัปเดต	9,545.3
การลงทุนในทุนคงที่		395,450.0
การลงทุนในทุนหมุนเวียน	15% ของเงินลงทุนคงที่	59,315.0
การลงทุนในทุนทั้งหมด	ต้นทุนคงที่+ต้นทุนเงินลงทุนหมุนเวียน	454,765.0

ต้นทุนการจัดส่งสำหรับอุปกรณ์นี้คำนวณเป็น 10% ของ BMC ที่อัปเดตทั้งหมด ส่งผลให้ได้ 23,866.7 บาท ต้นทุนการติดตั้งประมาณเป็น 80% ของต้นทุนการจัดส่งอุปกรณ์ที่ซื้อ ซึ่งเท่ากับ 19,090.5 บาท ต้นทุนด้านเครื่องมือวัดและการควบคุมคิดเป็น 26% ของต้นทุนการจัดส่งอุปกรณ์ที่ซื้อ ซึ่งคิดเป็น 6,203.7 บาท ในขณะที่ต้นทุนด้านท่อคิดเป็น 80% ของต้นทุนการจัดส่งอุปกรณ์ที่ซื้อ ซึ่งรวมเป็น 19,090.5 บาท ระบบไฟฟ้า (8.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมง) สำหรับวัตถุประสงค์ทางอุตสาหกรรมนั้นคาดว่าจะมีราคา 3,579.5 บาท ต้นทุนการก่อสร้างประมาณการไว้ที่ 6% ของต้นทุนการจัดส่งอุปกรณ์ที่ซื้อ ซึ่งคิดเป็น 1,431.1 บาท และต้นทุนการปรับปรุงสนามหญ้าคิดเป็น 10% ของต้นทุนการจัดส่งอุปกรณ์ที่

ซื้อ ซึ่งคิดเป็น 2,386.3 บาท สิ่งอำนวยความสะดวกด้านบริการคำนวณเป็น 30% ของ BMC ที่ปรับปรุงใหม่ทั้งหมด ซึ่งคิดเป็น 71,596.5 บาทและต้นทุนที่ดินคิดเป็น 4% ของ BMC ที่ปรับปรุงใหม่ทั้งหมด ซึ่งคิดเป็น 9,545.3 บาท ผลรวมของต้นทุนเหล่านี้ทำให้เกิดการลงทุนคงที่ ซึ่งรวมเป็น 395,450.0 บาทค่านี้แสดงถึงต้นทุนคงที่ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการจัดตั้งอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอนพูนจากเศษวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล นอกจากนี้ การลงทุนในเงินทุนหมุนเวียนคิดเป็นเพียง 15% ของ FCI ซึ่งมีมูลค่า 59,315.0 บาท เมื่อรวมการลงทุนในเงินทุนคงที่และเงินทุนหมุนเวียนเข้าด้วยกัน จะได้ต้นทุนการลงทุนทั้งหมดซึ่งมีมูลค่า 454,765.0 บาท ต้นทุนที่ครอบคลุมนี้รวมถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการจัดหา การจัดส่ง การติดตั้ง และการดำเนินการเบื้องต้นของอุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกที่จำเป็นในการผลิตคาร์บอนพูนจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตน้ำตาล การวิเคราะห์นี้ให้มุมมองที่โปร่งใสเกี่ยวกับข้อกำหนดทางการเงินสำหรับการจัดตั้งโรงงานผลิตคาร์บอนพูน ทำให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถเข้าใจถึงการลงทุนที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ได้

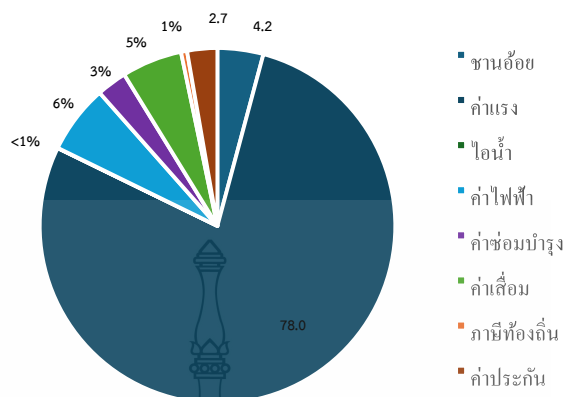
4.5.2. การประมาณต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิตทั้งหมดสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอนที่มีพูนจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปน้ำตาลสุรปไว้ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7 ต้นทุนแรงงานในการดำเนินงานเป็นปัจจัยหลักของต้นทุนการผลิตโดยรวม โดยคิดเป็นประมาณ 78% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ต้นทุนที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ไฟฟ้า (6%) ค่าเสื่อมราคา (5%) การบำรุงรักษา (3%) และประกันภัย (3%) แม้ว่าต้นทุนแรงงานในการดำเนินงานจะสูงกว่า แต่ค่าใช้จ่ายเหล่านี้ยังคงคิดเป็นส่วนใหญ่ของต้นทุนโดยรวมผลลัพธ์เหล่านี้เน้นให้เห็นถึงพื้นที่ที่การเพิ่มประสิทธิภาพอาจส่งผลให้ต้นทุนลดลง ขานอ้อยซึ่งเป็นวัตถุดิบคิดเป็น 4% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด การใช้ความร้อนและไอน้ำส่วนเกินจากโรงงานผลิตน้ำตาลช่วยลดต้นทุนสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไอน้ำและการจ่ายไฟฟ้าได้อย่างมาก ส่งผลให้ต้นทุนไอน้ำลดลงเพียงเล็กน้อย โดยอยู่ที่น้อยกว่า 1% ต้นทุนไอน้ำที่ต่ำ (< 1%) บ่งชี้ถึงการใช้ไอน้ำส่วนเกินจากหม้อไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพเป็นตัวกระตุ้นที่คุ้มต้นทุนไม่มีต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะ ซึ่งหมายถึงการจัดการขยะอย่างมีประสิทธิภาพหรือการสร้างขยะให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังไม่มีค่าใช้จ่ายในห่วงโซ่อุปทานและไม่มีต้นทุนทรัพย์สินทางปัญญาที่เกี่ยวข้อง ต้นทุนค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรงคิดเป็น

10% ของต้นทุนการลงทุนทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นการสึกหรอของอุปกรณ์ตามกาลเวลา ไม่มีรายการต้นทุนค่าใช้จ่ายทางอ้อมของโรงงาน ซึ่งบ่งชี้ว่า ต้นทุนเหล่านี้รวมอยู่ในหมวดหมู่อื่น ต้นทุนการผลิตประจำปีทั้งหมดที่ 719,216.0 บาทต่อปีรวมส่วนประกอบเหล่านี้ทั้งหมดการใช้ไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีต้นทุนการจัดการขยะมีส่วนทำให้ประหยัดโดยรวมได้อย่างมาก การใช้ไอน้ำจากผลพลอยได้และวัสดุเหลือใช้ไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าใช้จ่าย แต่ยังช่วยเพิ่มความยั่งยืนของกระบวนการอีกด้วย ชานอ้อยซึ่งมีปริมาณคาร์บอนสูง 43% จะถูกแปลงเป็นคาร์บอนพูนที่มีมูลค่าสูงซึ่งมีปริมาณคาร์บอนคงที่มากกว่า 96%

ตารางที่ 4.7 ตัวชี้วัดศักยภาพเศรษฐกิจและต้นทุนการผลิตรวม

คำอธิบาย	คำอธิบาย	ค่าใช้จ่าย (บาท/ปี)
ชานอ้อย		30,063.4
กากหม้อกรอง		-
แรงงานในการดำเนินงาน		561,215.1
ไอน้ำ		105.0
ค่าไฟฟ้า		44,801.2
ของเสีย		-
ต้นทุนการผลิตทางอ้อม		
ค่าบำรุงรักษา	$0.05 \times \text{ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด}$	19,769.4
การวิจัยและพัฒนา		
ค่าลิขสิทธิ์	ไม่มีค่าลิขสิทธิ์	-
ค่าเสื่อมราคา	$0.1 \times \text{ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด}$	39,538.7
ภาษีท้องถิ่น	$0.01 \times \text{ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด}$	3,953.9
ประกันภัย	$0.05 \times \text{ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด}$	19,769.4
ค่าใช้จ่ายทั่วไปของโรงงาน	ไม่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโรงงาน	-
ต้นทุนการผลิตทั้งหมด		719,216.0



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์การมีส่วนร่วมของส่วนประกอบต้นทุนแต่ละส่วนต่อต้นทุนการผลิตคาร์บอน
รุกรุ่นทั้งหมด

4.5.3 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ

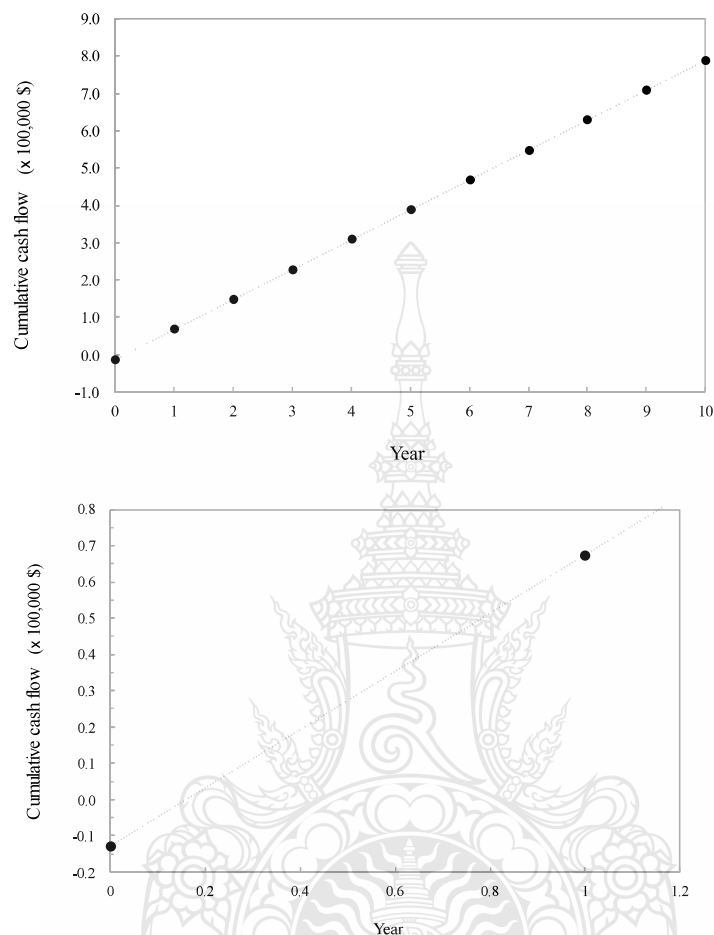
ศักยภาพทางเศรษฐกิจของการผลิตคาร์บอนรุกรุ่นจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปน้ำตาล
ได้รับการประเมินโดยใช้ตัวบ่งชี้หลักสามตัว ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ผลตอบแทนจากการลงทุน
(ROI) และระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (SPP) ซึ่งคำนวณจากสมการ (4.1)–(4.3) ตามลำดับ [31,32]

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (4.1)$$

$$ROI = \frac{\text{Profit}}{\text{Total investment cost}} \quad (4.2)$$

$$SPP = \frac{\text{Total investment cost}}{(\text{Revenue} - \text{Operatinf cost})} \quad (4.3)$$

ตัวบ่งชี้เหล่านี้ช่วยประเมินผลกำไรและความสามารถในการทำกำไรของโครงการ NPV แสดงความแตกต่างระหว่างมูลค่ารวมของกระแสเงินสดเข้า (เงินที่ได้รับ) และกระแสเงินสดออก (เงินที่ใช้ไป) ตลอดอายุการใช้งานทั้งหมดของโรงงาน โดยปรับตามมูลค่าปัจจุบัน NPV ที่เป็นบวกหมายความว่าโครงการคาดว่าจะสร้างรายได้มากกว่าต้นทุนการก่อสร้างและการดำเนินการ ในขณะที่ ROI วัดประสิทธิภาพของการลงทุนโดยแสดงกำไรที่สร้างขึ้นเมื่อเทียบกับเงินทุนเริ่มต้นที่ใช้ไปซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์และคำนวณโดยการหารกำไรสุทธิด้วยต้นทุนการลงทุนทั้งหมด SPP คือเวลาที่โครงการใช้ในการคืนทุนเริ่มต้นจากกำไรที่สร้างขึ้น ระยะเวลาคืนทุนที่สั้นลงบ่งชี้ว่าเงินที่ใช้ไปคืนทุนได้เร็วขึ้น สำหรับการวิเคราะห์นี้ ถือว่าโรงงานดำเนินการ 210 วันทำการต่อปี โดยรักษากำหนดการเดิมอย่างสม่ำเสมอตลอดอายุการใช้งาน 10 ปี โดยใช้ดอกเบี้ยประจำปี 7% มีการประมาณว่าคาร์บอนที่มีรูปทรงจะขายได้ในราคา 42 บาทต่อกิโลกรัม [33] มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อยู่ที่ประมาณ 19,270,462.6 บาท ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงการนี้จะสร้างผลตอบแทนทางการเงินที่สำคัญเกินกว่าการลงทุนเริ่มต้น โดย ROI ประมาณการไว้ที่ 494% ซึ่งหมายความว่ากระบวนการนี้สามารถให้ผลตอบแทนได้เกือบห้าเท่าของเงินทุนเริ่มต้นที่ใช้ไป ตัวเลขเหล่านี้ยืนยันถึงความสามารถในการทำกำไรของโครงการรูปที่ 4.8 แสดงกระแสเงินสดสะสม ซึ่งแสดงถึงเงินสดสุทธิทั้งหมดที่ได้รับในช่วงเวลาหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าการลงทุนนั้นเสมอทุน ซึ่งก็คือกระแสเงินสดสะสมจะถึงศูนย์ภายในปีแรกของการดำเนินการและกลายเป็นกำไรในเวลาไม่นานหลังจากนั้น ช่วงเวลาคืนทุนที่รวดเร็วนี้เน้นย้ำถึงความน่าดึงดูดทางเศรษฐกิจของกระบวนการนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ ความร้อนและไอน้ำส่วนเกินจากอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อผลิตคาร์บอนที่มีรูปทรง



รูป 4.8 แผนภูมิกระแสเงินสดสะสมสำหรับการผลิตคาร์บอนพอรุนจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปน้ำตาลในช่วงเวลา (a) 10 ปี และ (b) 1 ปี (มุมมองจาก Zoomed in)

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจของกระบวนการผลิตคาร์บอนที่มีรพุนกับกระบวนการอื่นๆ แต่ละกระบวนการมีข้อได้เปรียบและการใช้งานที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดความสามารถในการลงทุน และผลตอบแทนทางการเงินที่ต้องการ กระบวนการผลิตคาร์บอนที่มีรพุนให้ผลตอบแทนการลงทุนสูงสุดที่ 494% และระยะเวลาคืนทุนสั้นมากเพียง 0.16 ปี ในขณะที่การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารเหลือทิ้งให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงกว่ามาก ($12,421.5 \times 10^6$ บาท) แต่

มีระยะเวลาคืนทุนนานกว่า (4.35ปี) และผลตอบแทนการลงทุนปานกลาง (23%) ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมสำหรับการลงทุนด้านพลังงานขนาดใหญ่ในระยะยาวพร้อมผลตอบแทนที่สูงขึ้น ในทำนองเดียวกัน การผลิตเอทานอลจากอ้อยและข้าวโพดมี NPV (276.4×10^6 บาท) และผลตอบแทนการลงทุน (ROI) ที่สูงกว่า (87.03%) โดยมี SPP ที่รวดเร็วที่ 0.68 ปี ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานเชื้อเพลิงชีวภาพขนาดใหญ่

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจของกระบวนการนี้กับกระบวนการอื่นๆ

กระบวนการ	อายุการใช้งาน (ปี)	อัตราดอกเบี้ย (%)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ($\times 10^6$ บาท)	กำไรสุทธิ (%)	การคืนทุน (ปี)	อ้างอิง.
ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเหลือทิ้ง	10	7	12,421.5	23	4.35	[34]
ไบโอดีเซลจากเศษขนมปัง	15	10	5,703.4	32	2.2	[35]
เอทานอลจากอ้อยและข้าวโพด	25	8.5	276.4	87	0.68	[36]
คาร์บอนพูนจากขานอ้อย	10	7	19.2	494	0.16	งานวิจัยนี้

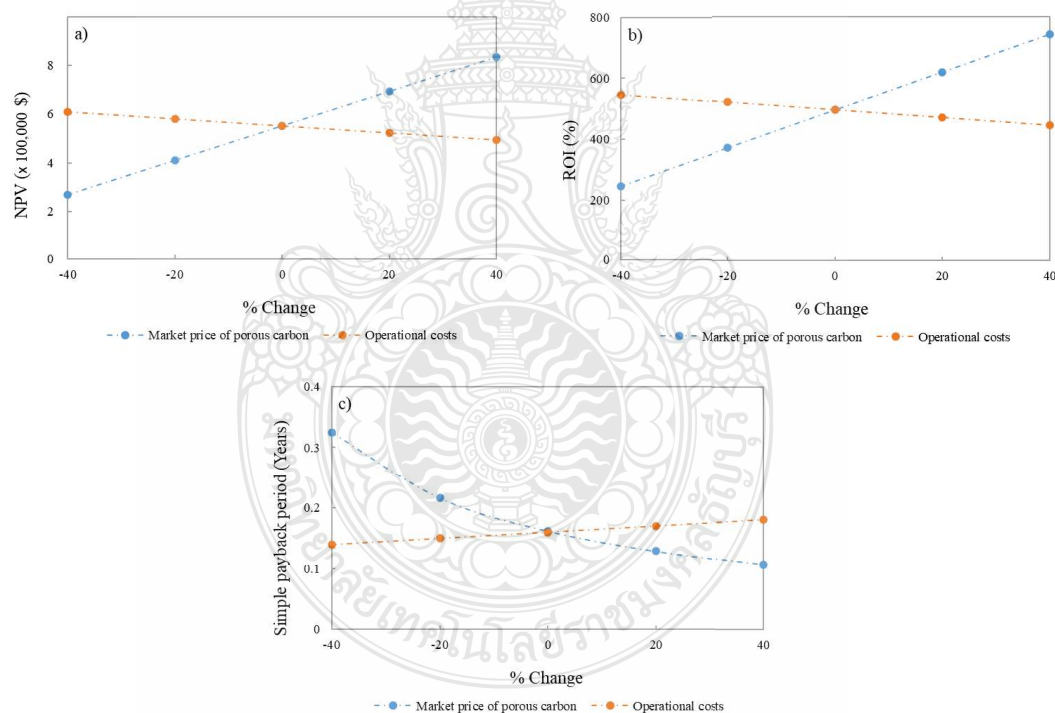
ดังนั้น กระบวนการคาร์บอนที่มีรูปพูนจึงโดดเด่นสำหรับการใช้งานขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่ต้องการผลตอบแทนทางการเงินอย่างรวดเร็ว กระบวนการนี้นำเสนอข้อได้เปรียบเพิ่มเติมสำหรับโรงงานน้ำตาล ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขานอ้อยและพลังงานส่วนเกินจากกระบวนการผลิตของตนในปริมาณมาก ด้วยการใช้อนุพันธ์ของเหล่านี้นี้ โรงงานสามารถผลิตคาร์บอนที่มีรูปพูน ซึ่งจะเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ให้กลายเป็นทรัพยากรที่มีค่าได้ยิ่งไปกว่านั้น คาร์บอนที่มีรูปพูนยังสามารถนำไปใช้โดยตรงในการพอกสี

น้ำเชื่อมซึ่งช่วยลดต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการใช้เรซินเพื่อจุดประสงค์นี้ การเปรียบเทียบนี้เน้นย้ำถึงความคล่องตัวของการรีไซเคิลชานอ้อยซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการมีส่วนร่วมสนับสนุนอย่างมากต่อเป้าหมายทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในการใช้งานในอุตสาหกรรม ขณะเดียวกันก็ให้โซลูชันที่ยั่งยืนและคุ้มค่าสำหรับโรงงานน้ำตาล

4.5.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะตรวจสอบอิทธิพลของพารามิเตอร์ทางเศรษฐกิจหลัก โดยเฉพาะราคาตลาดของคาร์บอนพูนและต้นทุนการดำเนินงานที่มีต่อประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจโดยรวมของกระบวนการผลิตคาร์บอนพูนที่เสนอ พารามิเตอร์เหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลง $\pm 40\%$ เพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่อตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจหลักสามตัว ได้แก่ NPV, ROI และ SPP ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 ราคาตลาดของคาร์บอนพูนมีอิทธิพลอย่างมากต่อ NPV, ROI และ SPP การเพิ่มขึ้นของราคาตลาด 40% ส่งผลให้ NPV เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยอยู่ที่ประมาณ 29,181,100.2 บาท ในขณะที่การลดลง 40% ทำให้ NPV ลดลงเหลือ 9,359,790.0 บาท ซึ่งยังคงเป็นไปในเชิงบวก ซึ่งบ่งชี้ถึงความยั่งยืนทางการเงินของโครงการอย่างต่อเนื่อง ในทำนองเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของราคาตลาดส่งผลกระทบต่อ ROI โดยราคาที่เพิ่มขึ้นทำให้ ROI เกิน 600% และลดลงส่งผลให้ ROI ลดลงแต่ยังคงแข็งแกร่งเมื่อเกิน 200% ระยะเวลาคืนทุนยังอ่อนไหวต่อความผันผวนของราคาตลาด โดยลดลงอย่างมีนัยสำคัญเหลือ 0.1 ปีหากราคาสูงขึ้น และขยายออกไปเล็กน้อยเป็น 0.3 ปีหากอยู่ในเงื่อนไขที่ไม่เอื้ออำนวย ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าแม้ในสถานการณ์ราคาตลาดที่ต่ำกว่า กระบวนการนี้ยังคงเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้โดยมีผลตอบแทนจากการลงทุนที่รวดเร็ว ราคาตลาดของคาร์บอนพูนมีผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดต่อความสามารถในการทำกำไรเมื่อเทียบกับต้นทุนการดำเนินงาน ซึ่งเน้นย้ำถึงความสำคัญของกลยุทธ์ด้านราคาและสถานะตลาดสำหรับความสำเร็จของกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการดำเนินงานมีบทบาทสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ ต้นทุนการดำเนินงานที่เพิ่มขึ้นจะลด NPV และ ROI ในขณะที่ขยายระยะเวลาคืนทุนเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม แม้ในสถานการณ์ที่มีต้นทุนที่สูงขึ้นซึ่งไม่เอื้ออำนวยที่สุด โครงการนี้ก็ยังคงทำได้ โดยมีระยะเวลาคืนทุนที่ต่ำกว่าหนึ่งปีอย่างสม่ำเสมอ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าต้นทุนการดำเนินงานควรได้รับการติดตามและควบคุม แต่กระบวนการนี้ไม่ควรไวต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนเล็กน้อยมากเกินไป ซึ่งจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นทางเศรษฐกิจ การศึกษานี้เสนอ

ศักยภาพในการใช้ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลสำหรับการผลิตคาร์บอนที่มีรูพรุนอย่างยั่งยืนและการประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีของน้ำเชื่อม อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องยอมรับข้อจำกัดบางประการเพื่อปรับปรุงผลการค้นพบและเพิ่มความสามารถในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทดลองหนึ่งเดือนโดยนำข้อมูลมาสรุปเพื่อแสดงสถานการณ์การผลิตประจำปีสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจอย่างครอบคลุมยิ่งไปกว่านั้น ในขณะที่กระบวนการทางอุตสาหกรรมมักใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุกการทดลองการกำจัดสีจะดำเนินการในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์แม้ว่าความแตกต่างในเชิงวิธีการนี้อาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลง แต่แนวโน้มการเปรียบเทียบระหว่างเรซินอุตสาหกรรมและตัวอย่างคาร์บอนยังคงมีความถูกต้องและชี้ให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เป็นไปได้



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในราคาตลาดและต้นทุนการดำเนินงานสำหรับการผลิตคาร์บอนพรุน: (a) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (b) ผลตอบแทนจากการลงทุน และ (c) ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาค้างนี้แสดงให้เห็นถึงการแปลงผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมน้ำตาลอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะกากอ้อยและกากหม้อกรองเป็นคาร์บอนพูนประสิทธิภาพสูง สำหรับการดูดซับที่ส่งเสริมแนวทางปฏิบัติด้านอุตสาหกรรมที่ยั่งยืน BA900 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่มีแนวโน้มดีที่สุดด้วยพื้นที่ผิว $366.32 \text{ m}^2/\text{g}$. ปริมาตรรูพรุนรวม $0.105 \text{ cm}^3/\text{g}$. และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยนาโนเมตร โดยมีประสิทธิภาพการลดค่าสีประมาณ 39% ที่น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 g. ซึ่งถือเป็นทางเลือกอื่นที่คุ้มค่าเมื่อเปรียบเทียบกับเรซินเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการลดค่าสีที่สูงกว่าประมาณ 72% กระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ $700\text{--}900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ความร้อนและไอน้ำส่วนเกินในอุตสาหกรรมน้ำตาล FA900 และ CA900 มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีน้อยกว่า BA900 เนื่องจากองค์ประกอบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและโครงสร้างรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากการลดค่าสีน้ำเชื่อมแล้ว โครงสร้างรูพรุนแบบเมโสพอร์สและกระบวนการผลิตที่ยั่งยืนของ BA900 ยังทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า BA900 ไม่ดูดซับโมเลกุลน้ำตาล เช่น กลูโคสและซูโครส เนื่องจากผลของ BA900 ทำให้กลุ่มไฮดรอกซิลในน้ำเชื่อมติดลดลง น้ำเชื่อมที่ดูดซับโดย BA900 หรือ RS-B จึงมีความเป็นกรด ไรโบฟลาวินและวิตามินซีถูกค้นพบโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์มวลไรโบฟลาวินเป็นอนุพันธ์ของวิตามินบี 2 อีกชนิดหนึ่งที่เป็นประโยชน์ต่อเซลล์ของมนุษย์ ในขณะที่วิตามินซีเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ดูเหมือนว่าปริมาณของ Vitexin จะมีผลต่อสีของน้ำเชื่อม ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อสีของน้ำเชื่อม การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการมีอยู่ของ Vitexin ที่ส่งผลต่อสีของน้ำเชื่อมจึงถือเป็นความท้าทายสำหรับงานวิจัยในอนาคต แนวทางนี้สอดคล้องกับหลักการของเคมีสีเขียวโดยใช้วัตถุดิบหมุนเวียนลดของเสีย และใช้ประโยชน์จากความร้อนเสียจากอุตสาหกรรม ลดการพึ่งพาวัสดุสังเคราะห์ราคาแพงในขณะส่งเสริมการหมุนเวียนทรัพยากรในอุตสาหกรรมน้ำตาล การวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจยืนยันถึงความเป็นไปได้และความสามารถในการทำกำไรของกระบวนการ โดยมี NPV อยู่ที่ 19,270,462.6 บาท ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) อยู่ที่ 494% และระยะเวลาคืนทุนเพียงไม่ถึงหนึ่งปี แนวทางนี้ยังถึงประโยชน์ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจของกระบวนการนี้ การศึกษาในอนาคตควรเน้นที่การเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการลดค่าสีของน้ำเชื่อม การนำไปใช้ในกระบวนการต่อเนื่อง และการขยายขอบเขตการใช้งานให้ครอบคลุมถึงการดูดซับสารมลพิษที่เพิ่งเกิดขึ้น การบำบัดน้ำเสีย โลหะหนักและปฏิกิริยาเร่ง จึงทำให้แนวทางนี้มีความเกี่ยวข้องและส่งผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น



บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Somnath Mukherjee, Sunil Kumar, Amal K. Misra , & Maohong Fan, “Removal of phenols from water environment by activated carbon, bagasse ash and wood charcoal.” *Journal Chemical Engineering*, vol. 129, 133-142, May 2007.
- [10] ทศนีย์ น้อยเลิศ. (2559). การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราเพื่อการดูดซับเหล็กในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [11] สัมพันธ์ สร้อยกล่อมและคณะ. (2560). การผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวลเปลือกมังคุดเพื่อกำจัดโลหะหนัก. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54 (หน้า 119-125). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] Marion Carrier, Ailsa G. Hardie, Ümit Uras , Johann Görgens , & Johannes (Hansie)-Knoetze, “Production of char from vacuum pyrolysis of South-African sugar cane bagasse and its characterization as activated carbon and biochar.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 96, 24–32, July 2012.
- [13] Jatinder Kumar Ratan, Manjeet Kaur, & Bharadwaj Adiraju, “Synthesis of activated carbon from agricultural waste using a simple method: Characterization, parametric and isotherms study.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, 3334–3345, 2018.
- [14] Ahmed O. Abo El Naga, Mohamed El Saied, Seham A. Shaban, & Fathy Y. El Kady, “Fast removal of diclofenac sodium from aqueous solution using sugar cane bagasse-derived activated carbon.” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 285, 9-19, July 2019.
- [15] S. Venkata Mohan. & J. Karthikeyan, “Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal.” *Environmental Pollution*, vol. 97, 183-187, 1997.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] W. Widiyastuti, Mahardika Fahrudin Rois, Ni Made Intan Putri Suari, & Heru Setyawan. "Activated carbon nanofibers derived from coconut shell charcoal for dyeremoval application." *Advanced Powder Technology*, vol. 31, 3267-3273, August 2020
- [17] Seyed Mohammad Nasehi, Sara Ansari, & Mohammad Sarshar, "Removal of dark colored compounds from date syrup using activated carbon: A kinetic study." *Journal of Food Engineering*, vol. 111, 490-495, August 2012.
- [18] Jia Wu, Jianwei Yang, Pu Feng, Guohuan Huang, Chuanhui Xu, & Baofeng Lin, "High-efficiency removal of dyes from wastewater by fully recycling litchi peel biochar." *Chemosphere*, vol. 246, 125734, May 2020.
- [19] Zaidi Ab Ghani, Mohd Suffian Yusoff, Nastaein Qamaruz Zaman, Mohd Faiz Muaz Ahmad- Zamri, & Jeyashelly Andas., "Optimization of preparation conditions for activated carbon from banana pseudo-stem using response surface methodology on removal of color and COD from landfill leachate." *Waste Management*, vol. 62, 177-187, April 2017.
- [20] P. Laksameethanasana, N. Somla, S. Janprem, & N. Phochuen, "Clarification of sugarcane juice for syrup production." *Procedia Engineering*, 32, 141 – 147, 2012.
- [21] Julio A. Solís-Fuentes, Frixia Galán-Méndez, María del Rosario Hernández-Medel, Rolando S. García-Gómez, Marisela Bernal-González, Samuel Mendoza-Pérez, & María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, "Effectiveness of bagasse activated carbon in raw cane juice clarification." *Food Bioscience*, vol. 32, 100437, December 2019.
- [22] Y. Satyawali. & M. Balakrishnan. "Removal of color from biometanated distillery spentwash by treatment with activated carbons." *Bioresource Technology*, vol. 98, 2629-2635, October 2007.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] H.L. Mudoga, H. Yucel, & N.S. Kincal. “Decolorization of sugar syrups using commercial and sugar beet pulp based activated carbons.” *Bioresource Technology*, vol. 99, 3528–3533, June 2008.
- [24] T. Iwashina, C.-I. Peng, and G. Kokubugata, “Flavone O- and C-glycosides from *Pothos chinensis* (Araceae),” *Bull. Natl. Mus. Nat. Sci.*, vol. 36, pp. 27-32, Feb. 2010.
- [25] S. N. Yurgel, S. A. Johnson, J. Rice, N. Sa, C. Bailes, J. Baumgartner, J. E. Pitzer, R. M. Roop and S. Roje, “A novel formamidase is required for riboflavin biosynthesis in invasive bacteria,” *Journal of Biological Chemistry*, vol. 298, no. 9, p. 102377, 2022.
- [26] L. Valgimigli, S. Gabbanini, and R. Matera, “CHAPTER 26 Analysis of Maltose and Lactose by U-HPLC-ESI-MS/MS,” 2012, pp. 443–463.
- [27] Y. J. Chen, L. Liang, X. M. Liu, T. P. Labuza, and P. Zhou, “Effect of fructose and glucose on glycation of β -lactoglobulin in an intermediate-moisture food model system: Analysis by liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) and data-independent acquisition LC-MS (LC-MSE),” *J Agric Food Chem*, vol. 60, no. 42, pp. 10674–10682, Oct. 2012.
- [28] Y. Fu et al., “Preparative separation of vitexin and isovitexin from pigeonpea extracts with macroporous resins,” *J Chromatogr A*, vol. 1139, no. 2, pp. 206–213, Jan. 2007.
- [29] P.A.O. George, J.J.C. Eras, A.S. Gutiérrez, L. Hens, C. Vandecasteele, “Residue from sugarcane juice filtration (filter cake) energy use at the sugar factory,” *Waste Biomass Valorization* 1, 407-413, 2010.
- [30] M.S. Peters, K.D. Timmerhaus, R.E. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, vol. 4, McGraw-hill, 2003.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] K. Im-orb, A. Arpornwichanop, L. Simasatitkul, “Process intensification approach for design and optimization of biodiesel production from palm fatty acid distillate,” *Biotechnol. Rep.* 30, 2021.
- [32] Y. Hu, J. Chen, H. Tian, Z. Hu, “Techno-economic and environmental evaluation of the production of biodiesel from rice-straw in China,” *Front. Energy Res.* 11, 2023.
- [33] S. Luanwuthi, P. Iamprasertkun, T. Akkharaamnuy, C. Kunyawut, A. Phukhrongthung, C. Puchongkawarin, “Techno-economic and environmental assessment of activated carbon electrodes for supercapacitors from oil palm leaves,” *ACS Sustain. Chem. Eng.* 12, 14446–14458, 2024.
- [34] S. Amornraksa, L. Simasatitkul, P. Khongprom, A. Sektaweelarp, S. Assabumrungrat, “Economic and environmental assessment of bio-hydrogenated diesel production process from waste cooking oil integrated with reforming process,” *Aided Chem. Eng.* 50, 2021.
- [35] R.H. Hafyan, J. Mohanarajan, M. Uppal, V. Kumar, V. Narisetty, S.K. Maity, et al., “Integrated biorefinery for bioethanol and succinic acid co-production from bread waste: techno-economic feasibility and life cycle assessment,” *Energy Convers. Manag.* 301, 2024.
- [36] M. Tena, L.S. Buller, W.G. Sganzerla, M. Berni, T. Forster-Carneiro, R. Solera, et al., “Techno-economic evaluation of bioenergy production from anaerobic digestion of by-products from ethanol flex plants,” *Fuel* 309, 2022.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวิวัฒน์ ฉ่ำชื่น
วัน เดือน ปีเกิด	6 ธันวาคม 2534
ที่อยู่	19/38 หมู่ 6 ตำบลม่วงค่อม อำเภอยะบะดี จังหวัดลพบุรี 15230
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน	นักวิทยาศาสตร์เคมี บริษัท โกลเด็นไลน์ บิโชนเท จำกัด ในเครือ บริษัท สหฟาร์ม จำกัด พ.ศ.2558 -2560 หัวหน้าแผนกควบคุมคุณภาพ บริษัท ทีพีไอ จำกัด (มหาชน) พ.ศ. 2560-2561 หัวหน้าแผนกวิเคราะห์คุณภาพ บริษัท น้ำตาลสระบุรี จำกัด พ.ศ. 2561-2566 ผู้จัดการแผนกควบคุมคุณภาพ บริษัท สุราษฎร์ธานี จำกัด (มหาชน) พ.ศ.2566 - ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-7792-6125
อีเมล	note06121991@gmail.com