

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### การเก็บตัวอย่างกากเหง้าขิง

ตัวอย่างกากเหง้าขิงที่นำมาทำการศึกษาวิจัย เป็นกากเหง้าของขิงพันธุ์ขิงขาว (ภาพที่ 4.1) อายุประมาณ 10-12 เดือน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท จินเจน ฟูดโปรดักส์ จำกัด โดยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตขิงผงสำเร็จรูปเพื่อจำหน่าย ซึ่งจะได้กากเหง้าขิงหลังผ่านกระบวนการผลิตขิงผงสำเร็จรูป ที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 เหง้าขิงพันธุ์ขิงขาว



ภาพที่ 4.2 กากเหง้าขิงหลังผ่านกระบวนการผลิตขิงผงสำเร็จรูป

### การเตรียมวัสดุดูดซับจากกากแห้งขิงโดยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเบส

ตัวอย่างกากแห้งขิงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตขิงผงสำเร็จรูปเพื่อจำหน่าย มีลักษณะเป็นเส้นใยสีน้ำตาล มีความยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร นำตัวอย่างกากแห้งขิงมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วนำมาอบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ๆ จะได้กากแห้งขิงก่อนการปรับสภาพแสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 เหง้าขิงก่อนปรับสภาพ

นำกากแห้งขิงมาทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเบส โดยการตัดแปลงจากวิธีของ Demir และคณะ (Demir et al., 2008) และ Ghali และคณะ (Ghali et al., 2001) ด้วยการนำกากแห้งขิงมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร แล้วนำไปต้มให้ความร้อนภายใต้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ป้องกันการเกิดเชื้อรา จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Syahrizul et al., 2012) หลังจากนั้นนำไปฟอกสีโดยแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จะทำให้สีของเหง้าขิงเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีเหลืองนวล นำกากแห้งขิงที่ได้มาล้างน้ำและอบจนแห้ง จะได้กากแห้งขิงหลังการปรับสภาพด้วยเบสมีลักษณะเป็นเส้นใยเล็ก ๆ เนื้อวัสดุฟู มีสีเหลืองนวล แสดงดังภาพที่ 4.4 เก็บกากแห้งขิงที่อบแห้งแล้วไว้ในโถดูดความชื้น หรือกล่องสุญญากาศ เพื่อป้องกันการดูดความชื้นก่อนการนำไปใช้งานในการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ และการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารให้ความชุ่มชื้นของกากแห้งขิงต่อไป



ภาพที่ 4.4 เหน้่าซิงหลังปรับสภาพ

#### การวิเคราะห์พื้นผิวของกากเห้่าซิงก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิว

จากการนำเส้นใยกากเห้่าซิงที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวเพื่อเตรียมเป็นวัสดุดูดซับมาทำการทดสอบสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ และ การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกากเห้่าซิงก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิว แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.1 พบว่า เส้นใยกากเห้่าซิงก่อนการปรับสภาพพื้นผิว มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าเส้นใยกากเห้่าซิงหลังผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยก่อนการปรับสภาพพื้นผิวกากเห้่าซิงมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.2871 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายต่างแล้ว เส้นใยกากเห้่าซิงซึ่งมีค่า พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 4.5480 ตารางเมตรต่อกรัม คำนวณร้อยละการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวได้ ร้อยละ 50

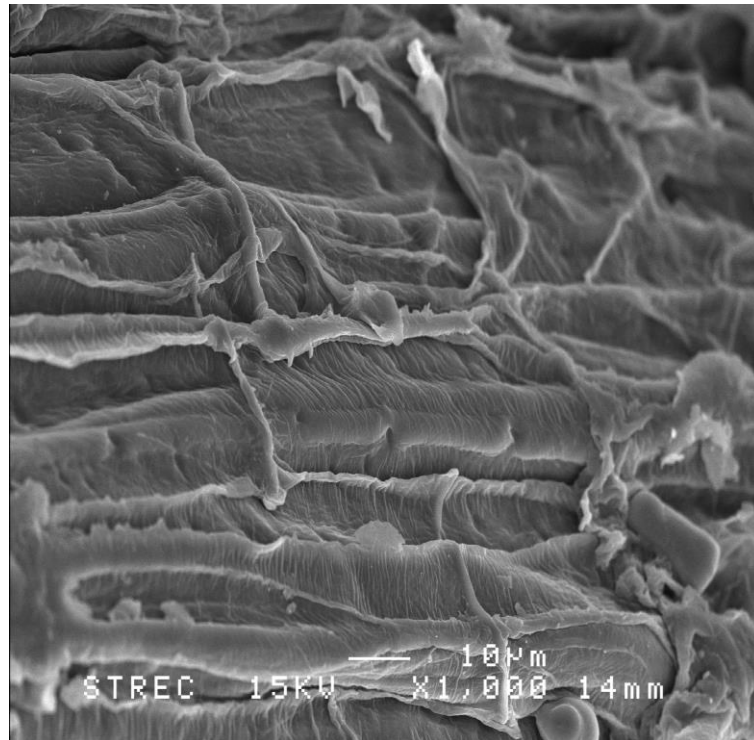
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยกากเห้่าซิงก่อนและหลังผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายต่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร มาคำนวณหาร้อยละของพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับสภาพพื้นผิว พบว่าเส้นใยกากเห้่าซิงหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 50 (แสดงการคำนวณดังภาคผนวก ก) เทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยกากเห้่าซิงก่อนการปรับสภาพ เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าของคณะผู้วิจัย ในการศึกษาผลการปรับสภาพ

พื้นผิวของกากรำข้าวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และเวลาเท่ากันกับการปรับสภาพพื้นผิวของขิงในงานวิจัยนี้ พบว่ากากรำข้าวมีร้อยละการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าการเหง้าขิง โดยกากรำข้าวมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวคิดเป็นร้อยละ 73 ขณะที่กากเหง้าขิงมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของกากรำข้าวก่อนการปรับสภาพมีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมากกว่า เมื่อกำจัดแป้งและน้ำตาลออกไปจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีมากขึ้น ขณะที่พื้นผิวของกากเหง้าขิงก่อนการปรับสภาพมีปริมาณแป้งและน้ำตาลไม่มากนัก การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะหลังการปรับสภาพพื้นผิวจึงมีน้อยกว่า

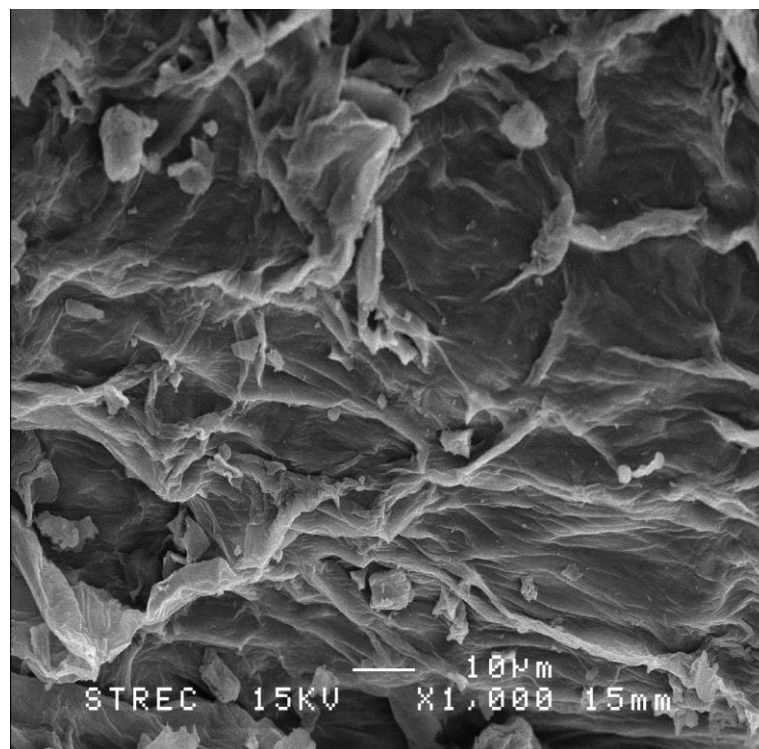
**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยกากเหง้าขิงก่อนและหลังผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

กากเหง้าขิง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
ก่อนการปรับสภาพพื้นผิว	2.2871
หลังการปรับสภาพพื้นผิว	4.5480

การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ผิวของกากเหง้าขิงก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ผลจากภาพถ่าย SEM พบว่า ก่อนการปรับสภาพด้วยสารละลายเบส พื้นผิวของกากเหง้าขิงมีลักษณะเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 แต่เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว พื้นผิวของกากเหง้าขิงมีลักษณะขรุขระมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ทั้งนี้ผลจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของกากเหง้าขิงก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กากเหง้าขิงมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น



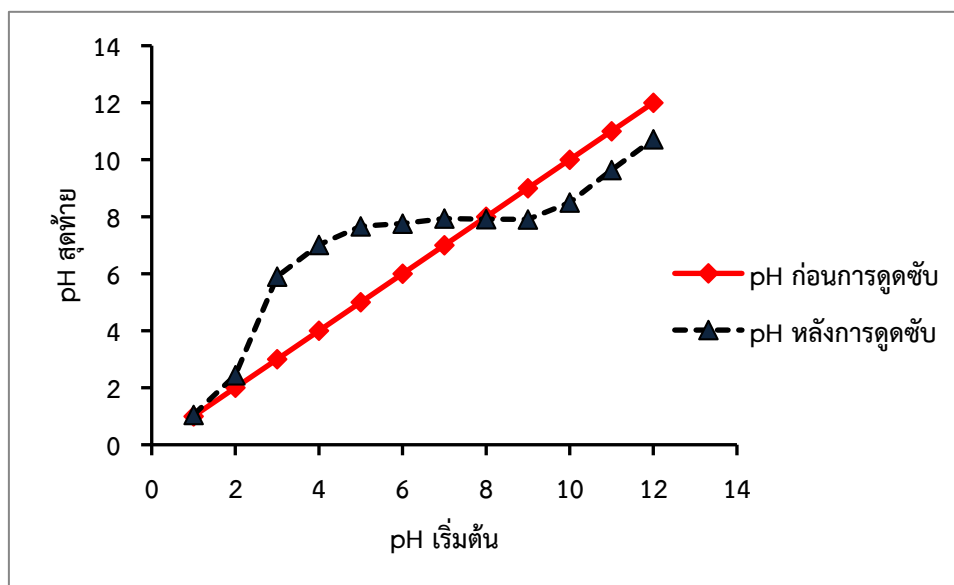
ภาพที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของกากไหมซึ่งก่อนการปรับสภาพพื้นผิว



ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของกากไหมซึ่งหลังการปรับสภาพพื้นผิว

### ผลการศึกษาหาประจุบนพื้นผิวของกากแห้งขิง

จากการทดลองเพื่อหาประจุบนพื้นผิวของกากแห้งขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส โดยใช้กากแห้งขิงน้ำหนัก 0.5 กรัม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส แสงในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชต่างๆ ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการบันทึกเป็นค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์ก่อนและหลังการแช่กากแห้งขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสแสดงดังตารางในภาคผนวก ข เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟโดยให้แกน x เป็นค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์เริ่มต้น ส่วนแกน y เป็นค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์หลังแช่กากแห้งขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส ที่ช่วงพีเอชต่าง ๆ แสดงกราฟดังภาพที่ 4.7 พบว่าแห้งขิงที่ปรับสภาพด้วยเบสมีประจุเป็นศูนย์ที่ช่วงพีเอชเท่ากับ 8 ส่วนที่พีเอชน้อยกว่า 8 สารละลายจะมีความเข้มข้นของโปรตอน ( $H^+$ ) มากกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้มีประจุบวกไปเกาะบนพื้นผิวของกากแห้งขิง พื้นผิวของกากแห้งขิงจึงมีประจุเป็นบวก ขณะที่พีเอชมากกว่า 8 พบว่ากากแห้งขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสจะมีพื้นผิวเป็นลบ เนื่องจากที่พีเอชมากกว่า 8 สารละลายจะมีความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) มากกว่าโปรตอน ( $H^+$ ) ทำให้มีประจุลบไปเกาะบนพื้นผิวของแห้งขิง พื้นผิวของแห้งขิงที่ปรับสภาพด้วยเบสจึงมีประจุเป็นลบ สำหรับการศึกษาการดูดซับสารให้ความชุ่มชื้นของกากแห้งขิงในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าพื้นผิวของแห้งขิงที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะมีประจุเป็นลบ



ภาพที่ 4.7 แสดงประจุศูนย์ของแห้งขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส

### การศึกษาหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับสารให้ความชุ่มชื้นของกากเหง้าขิง

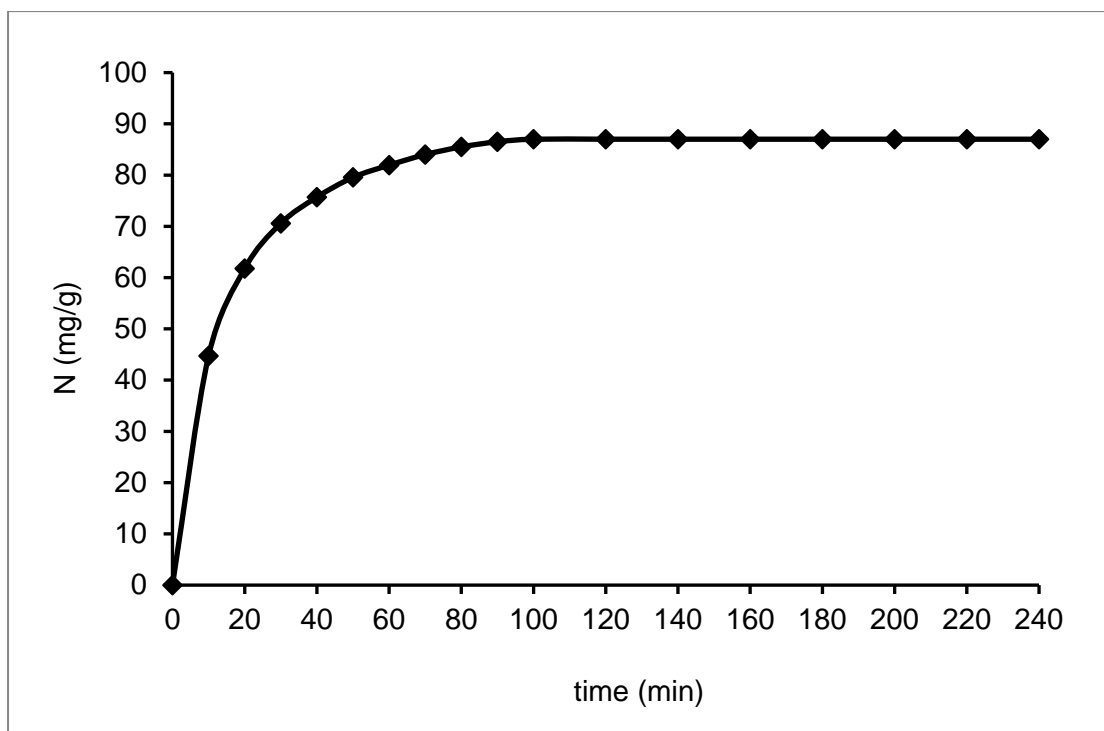
ในการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยนำกากเหง้าขิงมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกักเก็บสารให้ความชุ่มชื้น โดยเลือกกลีเซอริน (glycerin) มาใช้เป็นสารให้ความชุ่มชื้นเพื่อทำการศึกษาการดูดซับและเติมลงในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เนื่องจากกลีเซอรินเป็นสารให้ความชุ่มชื้นที่มีประสิทธิภาพดี มีความปลอดภัย และราคาไม่แพง เป็นที่นิยมใช้ในเครื่องสำอางเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิวพรรณ โดยทำการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงด้วยการใช้วิธีการทดลองแบบแบทช์ มีผลการศึกษาดังนี้

จากการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าขิง ด้วยการนำกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรแล้ว มาดูดซับกลีเซอรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่เวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240 และ 1440 นาที ตามลำดับ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิง ได้ข้อมูลของเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ กลีเซอรินโดยกากเหง้าขิงแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่ากากเหง้าขิงสามารถดูดซับกลีเซอรินได้เพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองการดูดซับกลีเซอรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยกากเหง้าขิงที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาสร้างกราฟแสดงเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยกำหนดให้แกน X คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ มีหน่วยเป็น นาที ใช้สัญลักษณ์  $t$  (min) ส่วนแกน Y คือ ปริมาณการดูดซับ กลีเซอรินต่อน้ำหนักของกากเหง้าขิง มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม ใช้สัญลักษณ์  $N$  (mg/g) แสดงกราฟดังภาพที่ 4.8 จากกราฟพบว่า ที่เวลา 0 ถึง 60 นาที ลักษณะของเส้นกราฟมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับที่เวลา 0 ถึง 60 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงเป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นผิวของกากเหง้าขิงยังมีพื้นที่ว่างในการดูดซับ กล่าวคือการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงยังไม่เข้าสู่สมดุล แต่หลังจากเวลา 90 นาทีเป็นต้นไป เส้นกราฟจะมีลักษณะขนานกับแกน X โดยการเพิ่มของระยะเวลาในการดูดซับภายหลัง 90 นาที ไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิง แสดงว่าในสารละลายเจือจางของกลีเซอรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 การดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 90 นาที โดยพบว่ากากเหง้าขิงมีความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินเท่ากับ 87 มิลลิกรัมต่อหนึ่งกรัมของกากเหง้าขิง

ตารางที่ 4.2 แสดงเวลาและปริมาณของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับโดยกากแห้งข้าง

เวลา (นาที)	ปริมาณการดูดซับกลีเซอรินต่อน้ำหนักกากแห้งข้าง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0
10	45
20	62
30	71
40	76
50	80
60	82
70	84
80	86
90	87
100	87
120	87
140	87
160	87
180	87
200	87
220	87
240	87
1440	87



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับปริมาณการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิง

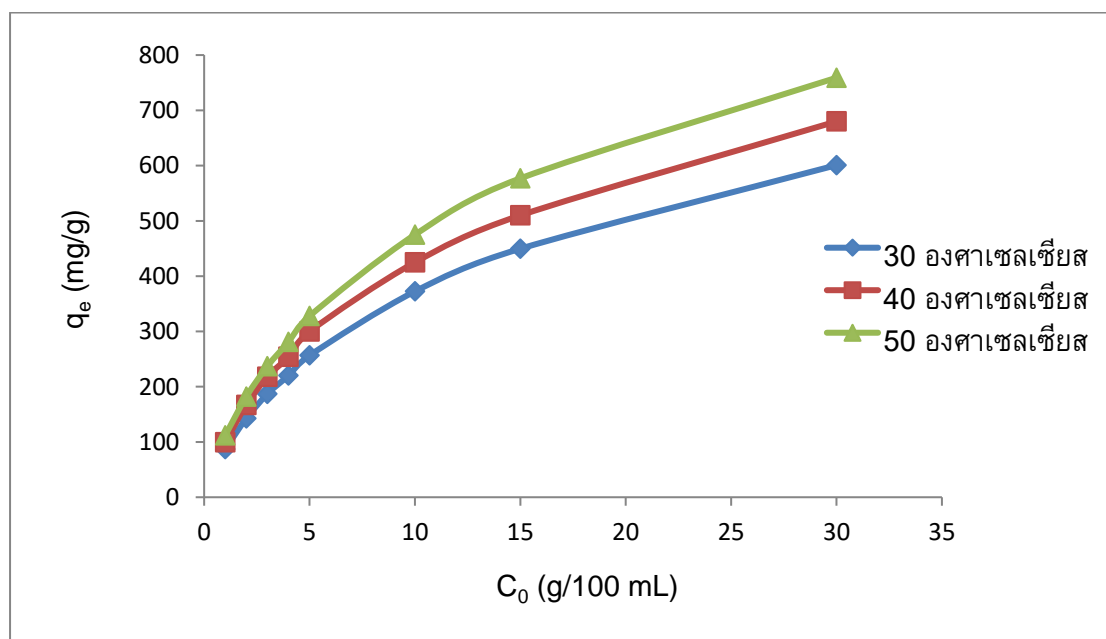
#### การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิง

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ โดยทำการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของกลีเซอรินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 และ 30 กรัมต่อร้อยมิลลิกรัม และศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิงที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีการทดลองแบบแบทช์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.3 มาพล็อตกราฟ โดยให้แกน X เป็นความเข้มข้นของกลีเซอริน ( $C_e$ ) หน่วยเป็นกรัมต่อร้อยมิลลิลิตร ( $g/100\text{ mL}$ ) และแกน Y เป็นปริมาณของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของกากแห้งขิงหนึ่งกรัม ( $q_e$ ) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม ( $mg/g$ ) จะได้กราฟแสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรินเพิ่มสูงขึ้น กากแห้งขิงก็สามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากช่วงความเข้มข้นของกลีเซอรินตั้งแต่ 0 ถึง 5 กรัมต่อร้อยมิลลิลิตร ซึ่งกากแห้งขิงสามารถดูดซับกลีเซอรินได้ระหว่าง 100 – 300 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการดูดซับกลีเซอรินที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยกากแห้งข้าง

ความเข้มข้น ของกลีเซอริน (g/100mL)	ปริมาณการดูดซับกลีเซอรินต่อน้ำหนักกากแห้งข้าง (mg/g)		
	30°C	40°C	50°C
1	87	100	112
2	143	167	182
3	187	218	237
4	220	254	281
5	257	300	328
10	372	425	475
15	450	510	577
30	601	680	759



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับปริมาณการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งข้าง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกากเหง้าขิงจะสามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้น และผลของความแตกต่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรินมากขึ้น โดยที่สภาวะความเข้มข้นมากที่สุดของกลีเซอรินที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้น 30 กรัมต่อร้อยมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส กากเหง้าขิงสามารถดูดซับกลีเซอรินได้เท่ากับ 601 680 และ 759 มิลลิกรัมต่อปริมาณของกากเหง้าขิงหนึ่งกรัมตามลำดับ

### การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิง

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิง ทำโดยเปรียบเทียบพฤติกรรมการดูดซับตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช ดังนี้

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ตามสมการที่ 4.1

$$\frac{1}{q_e} = \left( \frac{1}{q_{\max} K_L C_e} \right) + \left( \frac{1}{q_{\max}} \right) \dots\dots\dots(4.1)$$

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ต่อตัวดูดซับหนึ่งกรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_{\max}$  = ปริมาณการดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_L$  = ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม)

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงตามไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช โดยศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ตามสมการที่ 4.2

$$\log q_e = \log K_F + \left( \frac{1}{n} \log C_e \right) \dots\dots\dots(4.2)$$

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลต่อตัวดูดซับหนึ่งกรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

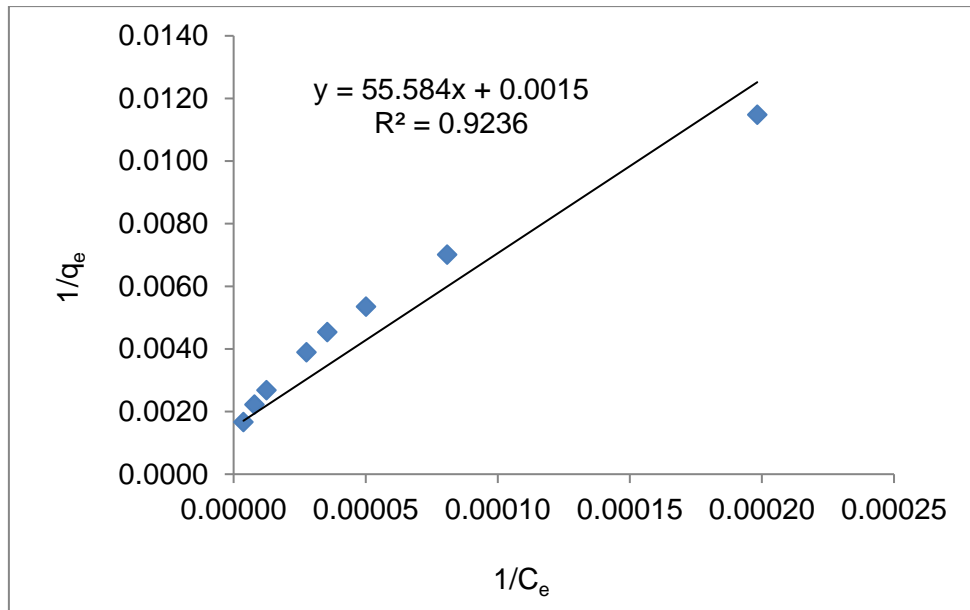
$K_F$  = ค่าคงที่ของฟรอยด์ลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$1/n$  = ความจุของการดูดซับ (มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม)

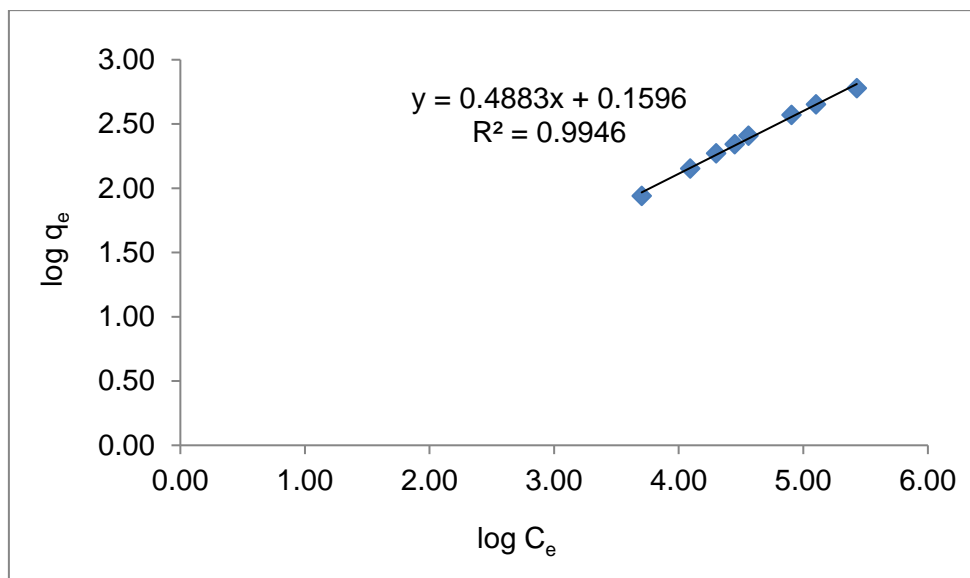
จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ กลีเซอรินของกากเห้ง้าขิง โดยศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นความเข้มข้น ที่ความเข้มข้นของกลีเซอริน ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 และ 30 กรัมต่อร้อยมิลลิกรัม และศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับ กลีเซอรินของกากเห้ง้าขิงที่สภาวะอุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส มาพล็อตกราฟ ความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ระหว่าง  $1/q_e$  กับ  $C_e$  และกราฟความสัมพันธ์ตาม สมการไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ในแต่ละอุณหภูมิ จะได้กราฟเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 4.10-4.15 ข้อมูลการศึกษาพฤติกรรมดูดซับของทั้งสองไอโซเทอร์ม แสดงดัง ตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่าตัวแปรตามสมการของแลงเมียร์ และสมการของฟรอยด์ลิชในการดูดซับ กลีเซอริน โดยเห้ง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส

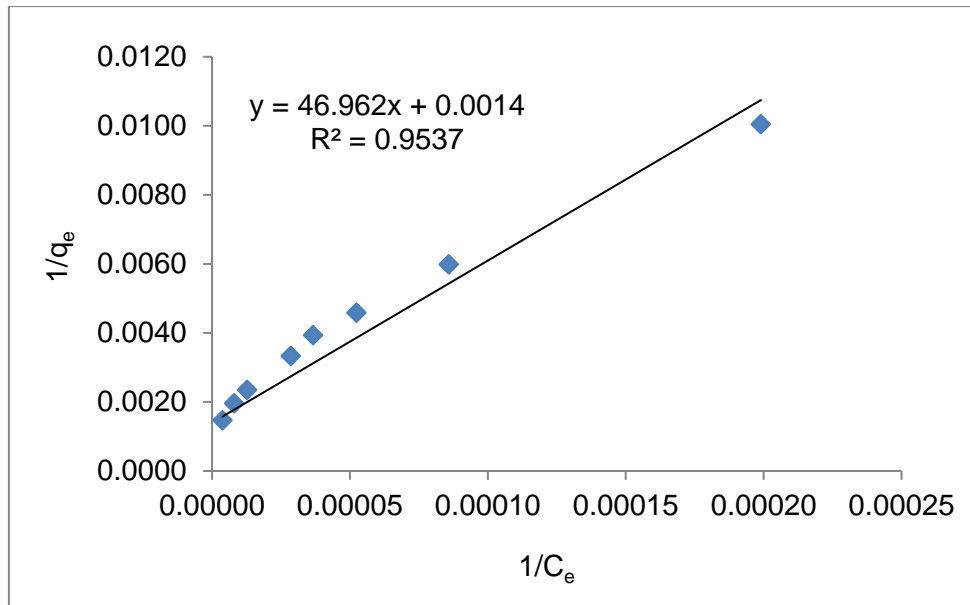
ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์				ไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช			
T (°C)	$q_{max}$	$K_L$	$R^2$	$K_F$	$1/n$	$n$	$R^2$
30	666.67	0.00003	0.9236	1.44	0.4883	2.0479	0.9946
40	714.29	0.00003	0.9537	1.04	1.8545	0.5392	0.9801
50	769.23	0.00003	0.9382	1.01	1.8239	0.5483	0.9803



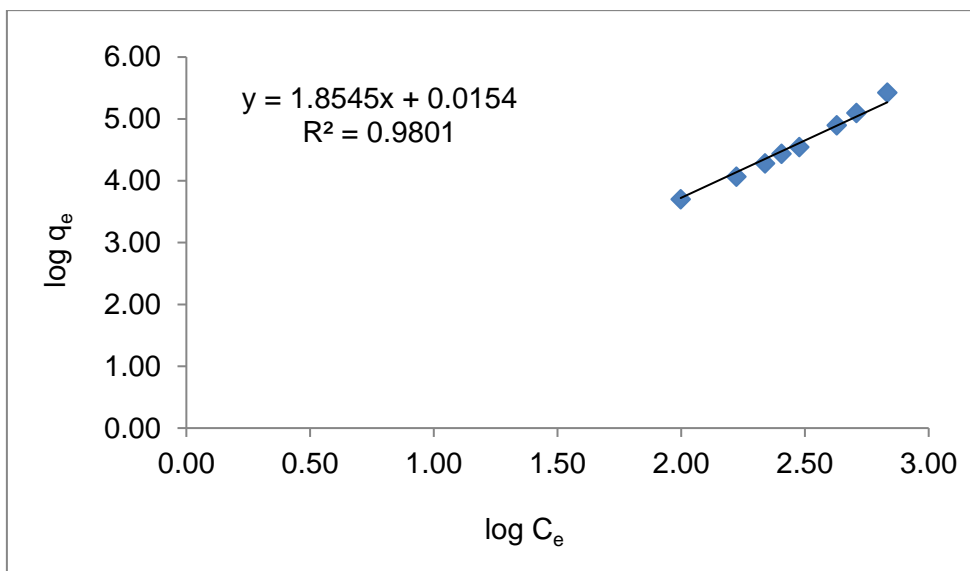
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



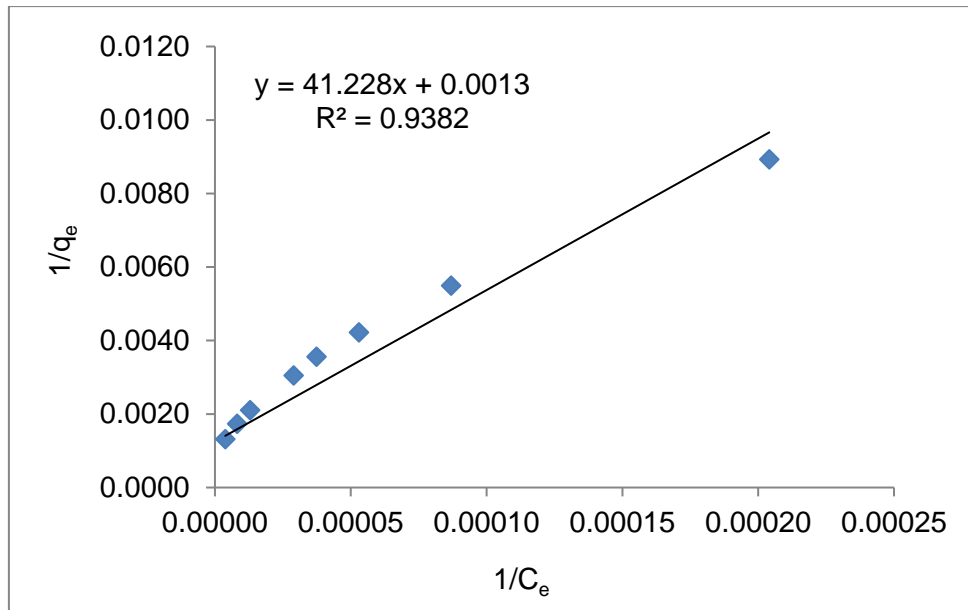
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



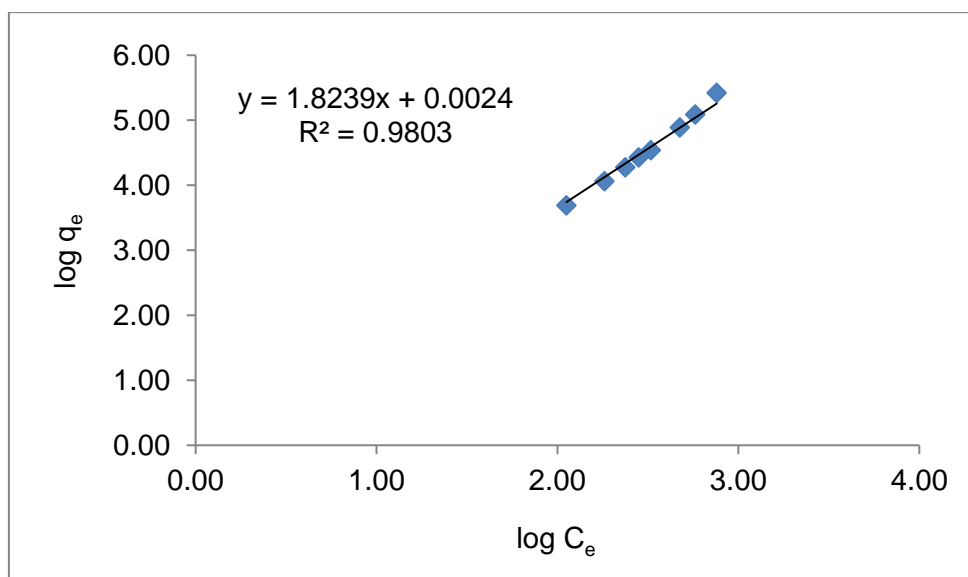
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชในการดูดซับกลีเซอรินของกากแห้งขิงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิซในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ผลจากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) จากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ และจากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิชมีค่าเข้าใกล้ 1 ทั้งคู่ โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงว่าพฤติกรรมดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิชมากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งหมายความว่า การดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าขิงที่ปรับสภาพด้วยเบส มีพฤติกรรมดูดซับแบบหลายชั้น

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) จากสมการของแลงเมียร์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 666.67, 714.29 และ 769.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ภายใต้อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสสามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้น

#### ผลของการศึกษาตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์

ผลของการศึกษาตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpy) แทนด้วยสัญลักษณ์  $\Delta H^\circ$  พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.13 kJ/mol ซึ่งมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าปฏิกิริยาการดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน สอดคล้องกับผลการทดลองการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าขิงก็เพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy) แทนด้วยสัญลักษณ์  $\Delta S^\circ$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของสาร พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.01 kJ/mol·K ซึ่งพบว่ามีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าลักษณะการเกิดการดูดซับกลีเซอรินบนพื้นผิวที่เป็นของแข็งของกากเหง้าขิงที่ปรับสภาพด้วยเบสเป็นแบบสุ่ม ไม่มีทิศทางที่แน่นอน และเมื่อพิจารณาตัวแปรพลังงานอิสระของกิบบส์ (Gibbs free energy) แทนด้วยสัญลักษณ์  $\Delta G^\circ$  พบว่าที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส การดูดซับกลีเซอรินบนพื้นผิวที่เป็นของแข็งของกากเหง้าขิง มีค่าพลังงานอิสระของกิบบส์เท่ากับ -1.13, -1.23 และ -1.35 kJ/mol ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเครื่องหมายพลังงานอิสระของกิบบส์มีค่าเป็นลบ หมายความว่า ปฏิกิริยาการดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสสามารถเกิดขึ้นได้เอง (Silberberg, 2013)

**ตารางที่ 4.5** แสดงการศึกษาตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับกลีเซอริน โดยกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส

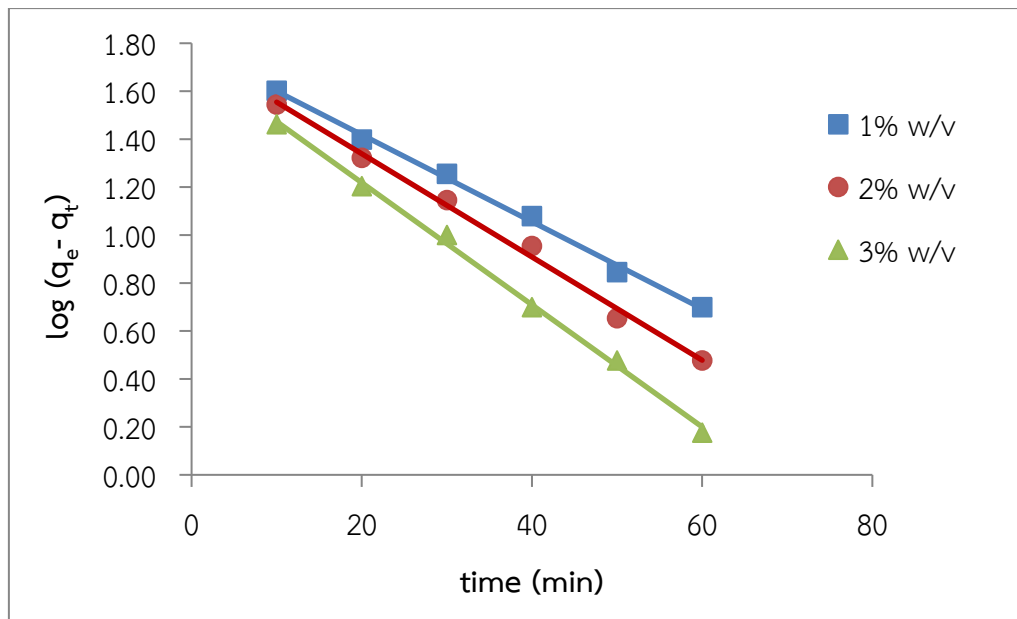
$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)			$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/mol·K)
30°C	40°C	50°C		
-0.69	-0.78	-0.86	1.91	0.01

#### ผลของการศึกษาทางจลนพลศาสตร์

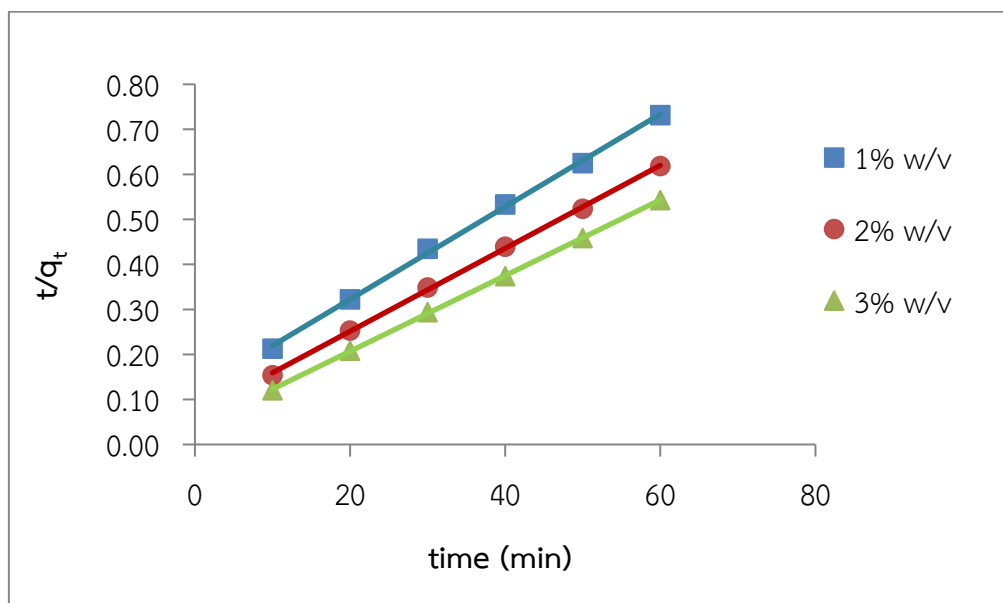
การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ เพื่อศึกษาหาอันดับของปฏิกิริยา ใช้สมการอันดับหนึ่งเทียม และสมการอันดับสองเทียม โดยสมการอันดับหนึ่งเทียม หมายถึง ปฏิกิริยาที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากกว่าหนึ่งชนิด แต่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นบางชนิดมีความเข้มข้นสูงมาก เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังกล่าวคงที่ จึงนำไปรวมกับค่าคงที่ และเมื่อศึกษากราฟอัตราการเกิดปฏิกิริยาพบว่าสอดคล้องกับสมการอันดับหนึ่ง โดยที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นบางตัวรวมอยู่กับค่าคงที่ จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ส่วนสมการอันดับสองเทียม ก็เป็นในทำนองเดียวกันกับสมการอันดับหนึ่งเทียม แต่กราฟอัตราที่ได้ เป็นไปตามสมการอันดับสอง (ปริชา พหลเทพ, 2536, หน้า 23) ผลจากการทดลองเพื่อศึกษาหาอันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับกลีเซอริน ด้วยกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.15 - 4.16

**ตารางที่ 4.6** แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวแปรตามสมการอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม ในการดูดซับกลีเซอรินด้วยกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

$C_0$ (g/100 mL)	$q_e$ (exp) (mg/g)	สมการอันดับหนึ่งเทียม			สมการอันดับสองเทียม		
		$q_e$ (cal) (mg/g)	$k_1$ (1/min)	$R^2$	$q_e$ (cal) (mg/g)	$K_2$ (mg/g·min)	$R^2$
1.0	87.00	60.45	0.0417	0.9962	97.09	0.00091	0.9989
2.0	100.00	58.82	0.0286	0.9944	108.70	0.00126	0.9994
3.0	112.00	53.43	0.0587	0.9975	119.05	0.00182	0.9998



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการอันดับหนึ่งเทียม ของกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส ในการดูดซับกลีเซอรินที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการอันดับสองเทียม ของกากเหง้าขิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส ในการดูดซับกลีเซอรินที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.12 เป็นกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ตามสมการอันดับหนึ่งเทียม ของการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าชิง ที่ความเข้มข้นของกลีเซอรินร้อยละ 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ากราฟเส้นตรงที่ได้มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9962, 0.9944 และ 0.9975 ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 4.13 เป็นกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ตามสมการอันดับสองเทียม ของการดูดซับกลีเซอรินของกากเหง้าชิง ที่ความเข้มข้นของกลีเซอรินร้อยละ 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ากราฟเส้นตรงที่ได้มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9989, 0.9994 และ 0.9998 ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าชิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียมมากกว่าอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งหมายความว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ซึ่งในที่นี้คือกลีเซอรินให้มากขึ้น จะมีผลทำให้เกิดการดูดซับได้เร็วขึ้น

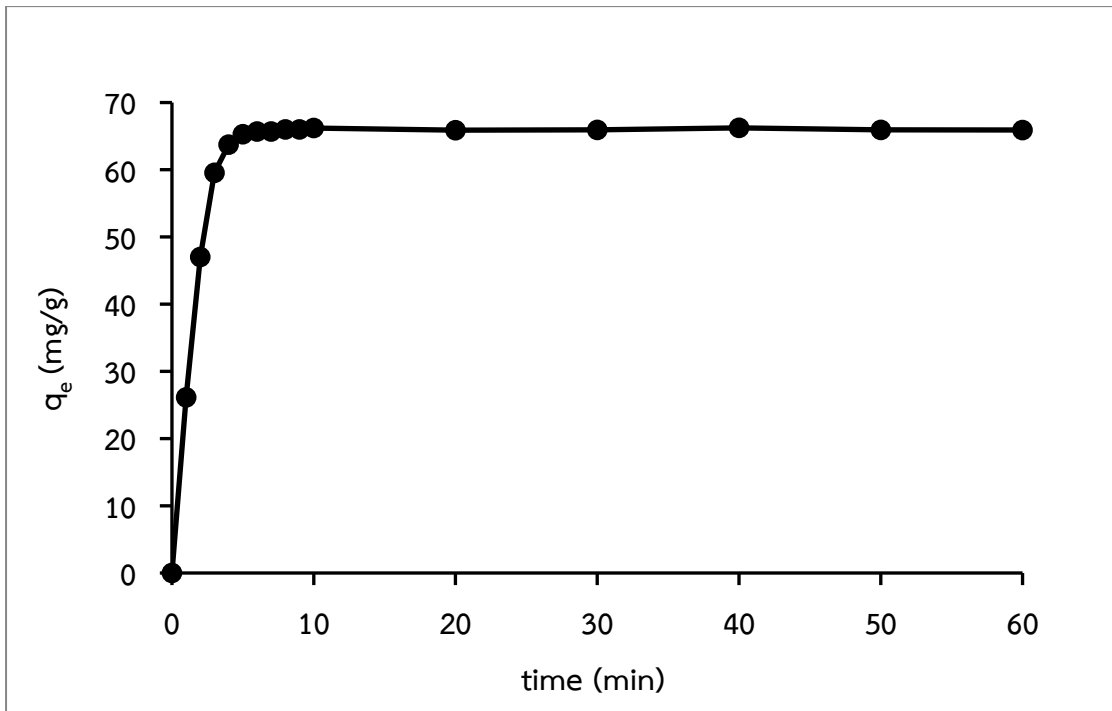
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.6 โดยศึกษาค่าปริมาณการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ ( $q_{e(cal)}$ ) จากสมการอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม เปรียบเทียบกับค่าปริมาณการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ( $q_{e(exp)}$ ) พบว่า ปริมาณการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการอันดับสองเทียม ที่ความเข้มข้นของกลีเซอรินร้อยละ 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าการดูดซับเท่ากับ 97.09, 108.70 และ 119.05 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการดูดซับกลีเซอรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 87.00, 100.00 และ 112.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีความใกล้เคียงมากกว่าค่าปริมาณการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ ( $q_{e(cal)}$ ) จากสมการอันดับหนึ่งเทียม เป็นการสนับสนุนจลนพลศาสตร์การดูดซับกลีเซอรินโดยกากเหง้าชิงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบสที่มีลักษณะเป็นอันดับสองเทียม

#### ผลของการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยกลีเซอรินของกากเหง้าชิง

จากการศึกษาการปลดปล่อยกลีเซอรินของกากเหง้าชิงในสภาวะที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เมื่อนำกากเหง้าชิงที่ผ่านการดูดซับสารละลายกลีเซอรินความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาแช่ในน้ำที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 และ 120 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงปริมาณการปลดปล่อยกลีเซอรินของกากเหง้าชิงที่ดูดซับกลีเซอรินเอาไว้ดังตารางที่ 4.7 พบว่าเหง้าชิงที่ปรับสภาพด้วยเบสสามารถปลดปล่อยกลีเซอรินที่ถูกดูดซับไว้ออกมาได้อย่างรวดเร็วใน 5 นาทีแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของกลีเซอรินจะค่อนข้างคงที่ ดังกราฟที่ 4.17 โดยกากเหง้าชิงมีความสามารถในการปลดปล่อยกลีเซอรินออกมาประมาณ 65 มิลลิกรัมต่อหนึ่งกรัมของเหง้าชิงที่ดูดซับกลีเซอริน คิดปริมาณการปลดปล่อยประมาณร้อยละ 75

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณการปลดปล่อยยกลีเซอร์รีนจากกากแห้งข้างหลังการดูดซับยกลีเซอร์รีน  
ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ปริมาณการปลดปล่อยยกลีเซอร์รีนของกากแห้งข้าง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	26.12
2	47.02
3	57.47
4	63.74
5	65.28
6	65.70
7	65.70
8	66.01
9	66.01
10	66.20
20	65.89
30	65.93
40	66.23
50	65.93
60	65.92
90	66.10
120	65.80



ภาพที่ 4.18 กราฟการปลดปล่อยกลีเซอรินโดยกากเหง้าขิงดูดซับกลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส