

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้น สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพ ในการดูดซับสีย้อม Reactive Yellow 145, Reactive Red 195 และ Reactive Blue 222 ของ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุดและเมล็ดมะขาม ที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ด้วยวิธีมาตรฐานของ ASTM 4607-94 และทำการ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับกับถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ด้วยการทดลองแบบเบทซ์ และ ใช้เครื่อง UVVIS Spectrophotometer ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาความเข้มข้น จากการศึกษาได้ผลดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

4.1.1 ผลการเตรียมถ่านและถ่านกัมมันต์

การเตรียมถ่านและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม ด้วยวิธีการเผาทำให้เกิดการสูญเสียสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบแต่ละชนิด ทำให้น้ำหนักของวัตถุดิบลดลง เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียทำให้ทราบได้ว่าวัตถุดิบแต่ละชนิดให้ปริมาณคาร์บอนมากน้อยแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียของถ่านและถ่านกัมมันต์ และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ได้

| วัตถุดิบ | น้ำหนัก ก่อนเผา (g) | หลังการเผา (Carbonization) | | หลังการกระตุ้น (Activation) | | % คาร์บอน |
|--------------|---------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|
| | | น้ำหนัก (g) | % น้ำหนัก ที่สูญเสีย | น้ำหนัก (g) | % น้ำหนัก ที่สูญเสีย | |
| ไมยราบยักษ์ | 50.12 ± 0.08 | 12.60 ± 0.62 | 74.86 ± 1.20 | 6.51 ± 0.32 | 48.33 ± 0.62 | 12.98 ± 0.62 |
| เปลือกมังคุด | 100.08 ± 0.04 | 41.23 ± 0.89 | 58.80 ± 0.87 | 26.20 ± 0.56 | 36.45 ± 0.55 | 26.18 ± 0.55 |
| เมล็ดมะขาม | 200.06 ± 0.04 | 61.39 ± 0.84 | 69.31 ± 0.41 | 36.62 ± 0.50 | 40.35 ± 0.25 | 18.31 ± 0.25 |

หมายเหตุ : ค่าน้ำหนัก เท่ากับ $\bar{x} \pm SD, n = 3$

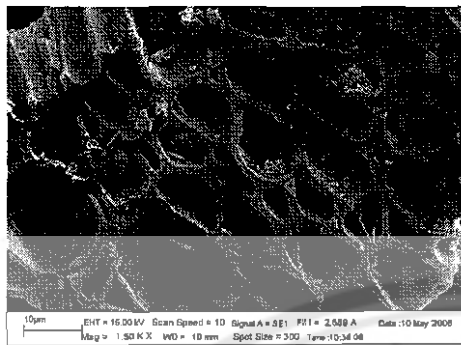
ผลจากการเผา (Carbonization) ไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม พบว่าไมยราบยักษ์มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผามากที่สุดเป็น 74.86 % รองลงมาเป็นเมล็ดมะขามและเปลือกมังคุด ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย 69.31 % และ 58.80 % ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านทั้งสามชนิดที่เตรียมได้จากการเผาไปทำการกระตุ้นด้วยสารละลาย 75 % KOH ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้ทั้งสามชนิดมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียลดลงเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผา โดยไมยราบยักษ์มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียหลังการกระตุ้นมากที่สุดเป็น 48.33 % รองลงมาเป็นเมล็ดมะขามและเปลือกมังคุด ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย 40.35 % และ 36.45 % ตามลำดับ จากกระบวนการเผาและกระบวนการกระตุ้นวัตถุดิบแต่ละชนิดทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน โดยเปลือกมังคุดให้ปริมาณคาร์บอนมากที่สุดเป็น 26.18 % รองลงมาเป็น เมล็ดมะขามและไมยราบยักษ์ ซึ่งให้ปริมาณคาร์บอนเป็น 18.31 % และ 12.98 % ตามลำดับ

4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของถ่านและถ่านกัมมันต์

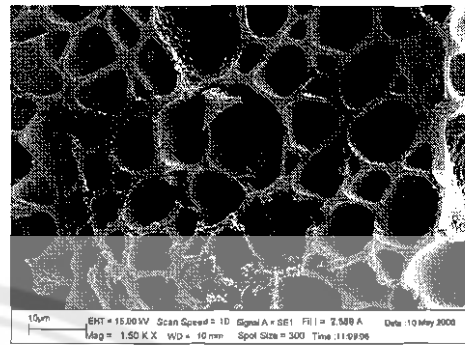
ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ถ่าน และถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM มีลักษณะดังภาพ 13 ภาพถ่าย SEM ของ ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ส่วนถ่านที่เตรียมจากไมยราบยักษ์ มีพื้นที่ผิวค่อนข้างเรียบแต่มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับถ่านที่เตรียมจากเปลือกมังคุดและเมล็ดมะขาม ซึ่งมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบกว่า และมีรูพรุนจำนวนน้อยกว่า สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH พบว่าทั้งสามชนิดมีรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากขึ้น

4.1.3 วิเคราะห์การดูดซับไอโอดีน (Iodine Number)

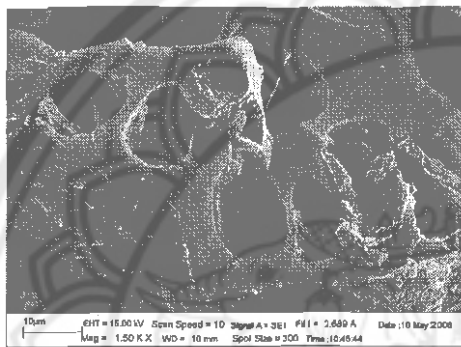
การวิเคราะห์นี้เป็นวิธีการหลักในการทดสอบคาร์บอน โดยใช้วิธีมาตรฐาน (ASTM 4607-94, 1999) ผลการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ดังแสดงในตาราง 6 พบว่าถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์มีค่า Iodine Number สูงสุด รองลงมาเป็น ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด ถ่านไมยราบยักษ์ ถ่านเมล็ดมะขามและถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์มาตรฐาน พบว่าถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ซึ่งมีค่า Iodine Number สูงสุด จากผลการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนนี้มีความสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM โดยถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับไอโอดีนได้สูง ส่วนถ่านกัมมันต์มาตรฐานมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ มีความเป็นพรุนสูงและมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าชนิดอื่น จึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสสูงกว่า ทำให้สามารถในการดูดซับไอโอดีนได้สูง



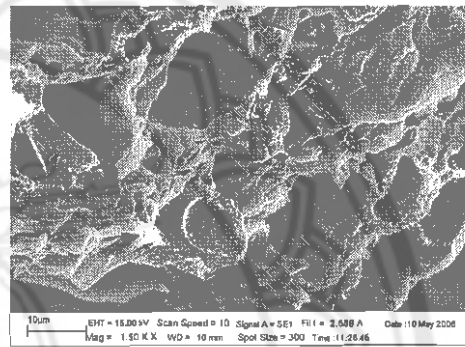
(a) ถ่านไมยราบยักษ์



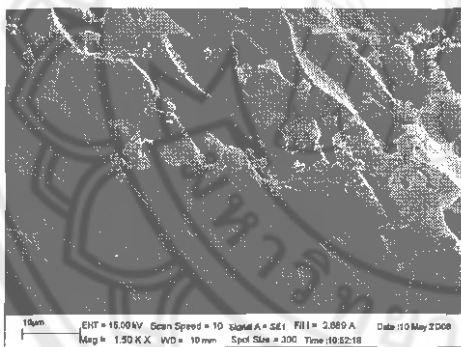
(b) ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์



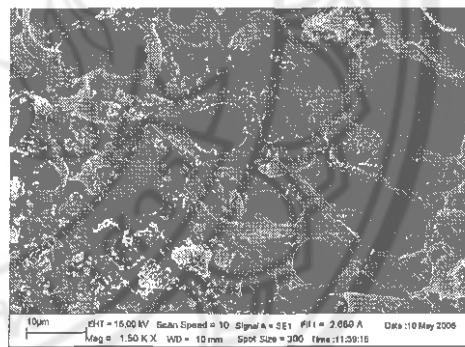
(c) ถ่านเปลือกมังคุด



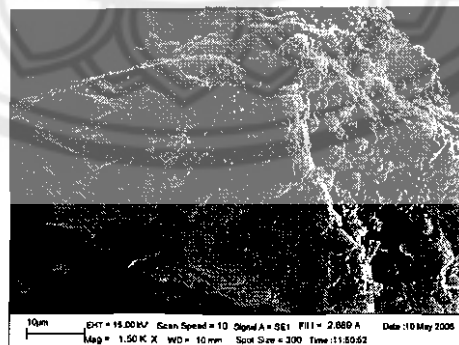
(d) ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด



(e) ถ่านเมล็ดมะขาม



(f) ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



(g) ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน

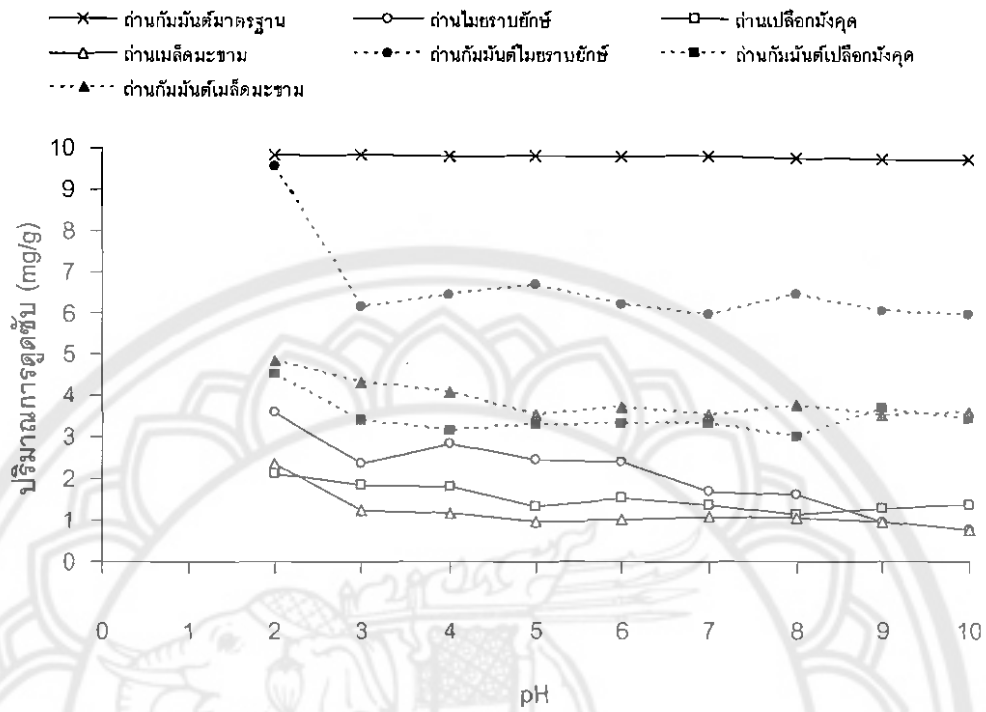
ภาพ 13 ภาพถ่าย SEM ของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์มาตรฐาน

ตาราง 6 ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ของถ่านและถ่านกัมมันต์

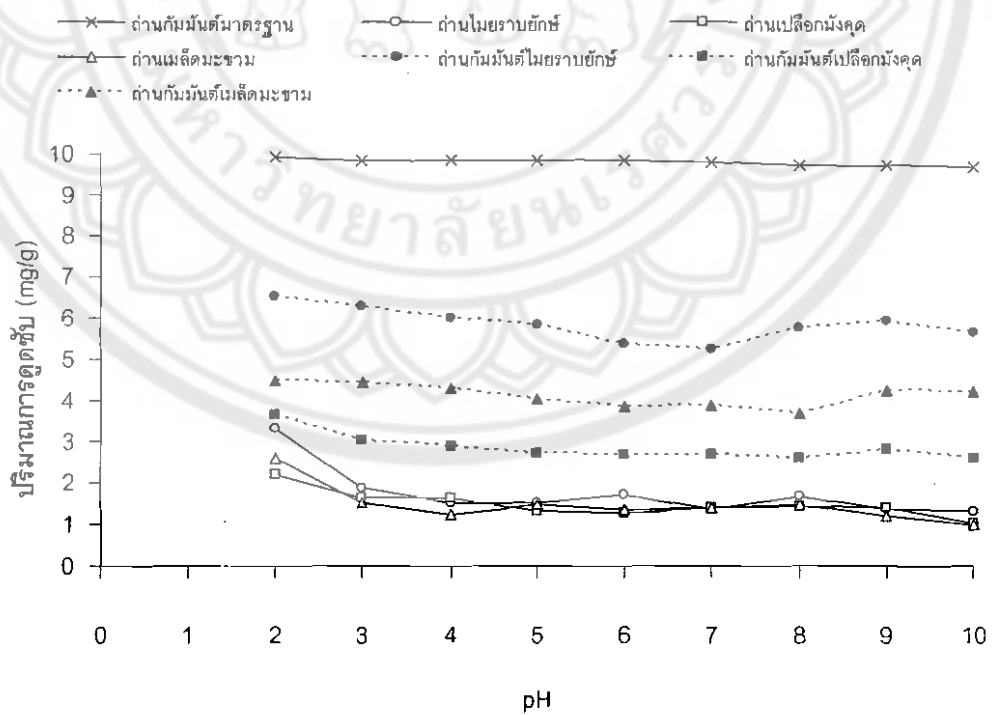
| ตัวดูดซับ | ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g) |
|--------------------------|----------------------------|
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 1,500 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 390 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | ต่ำกว่า 300 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | ต่ำกว่า 300 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 1,472 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 909 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 1,097 |

4.2 ผลการศึกษา pH และอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม

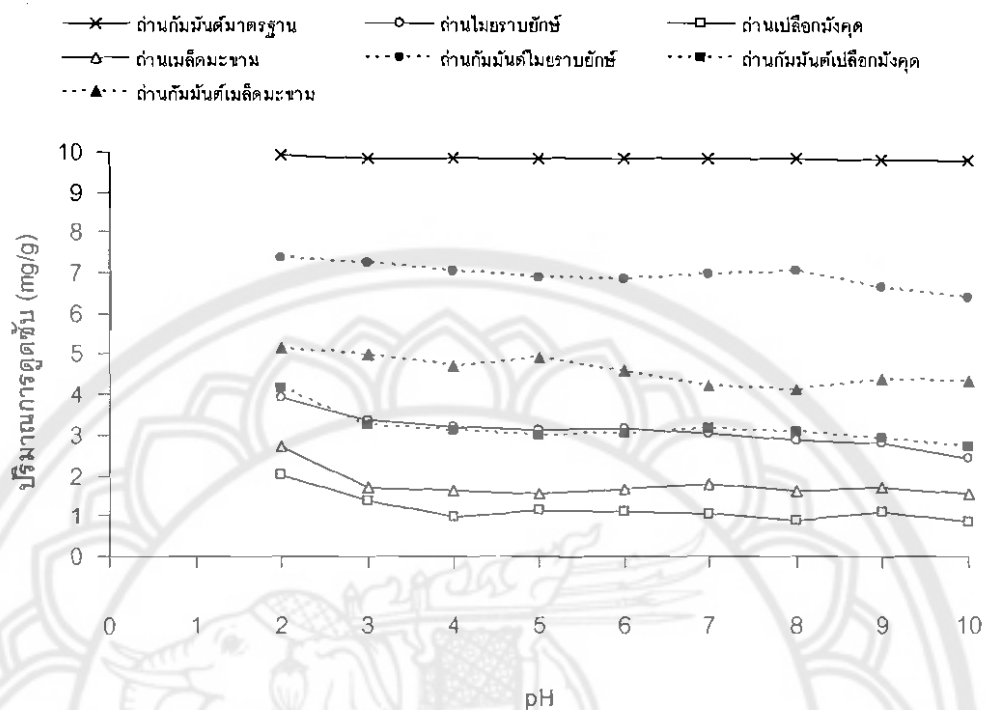
การศึกษาค่า pH และอุณหภูมิในการดูดซับสารละลายสีย้อม สีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพ 14-22 พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสารละลายสีย้อมทั้งสามโทนสีได้ดีที่ pH 2 และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับจะแตกต่างกันไปตามโทนสีและประเภทของตัวดูดซับ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่าถ่านกัมมันต์มาตรฐาน มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยมีค่าปริมาณการดูดซับ 9.94-9.11 mg/g รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด ถ่านไมยราบยักษ์ ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ทั้งนี้ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้ใกล้เคียงกัน



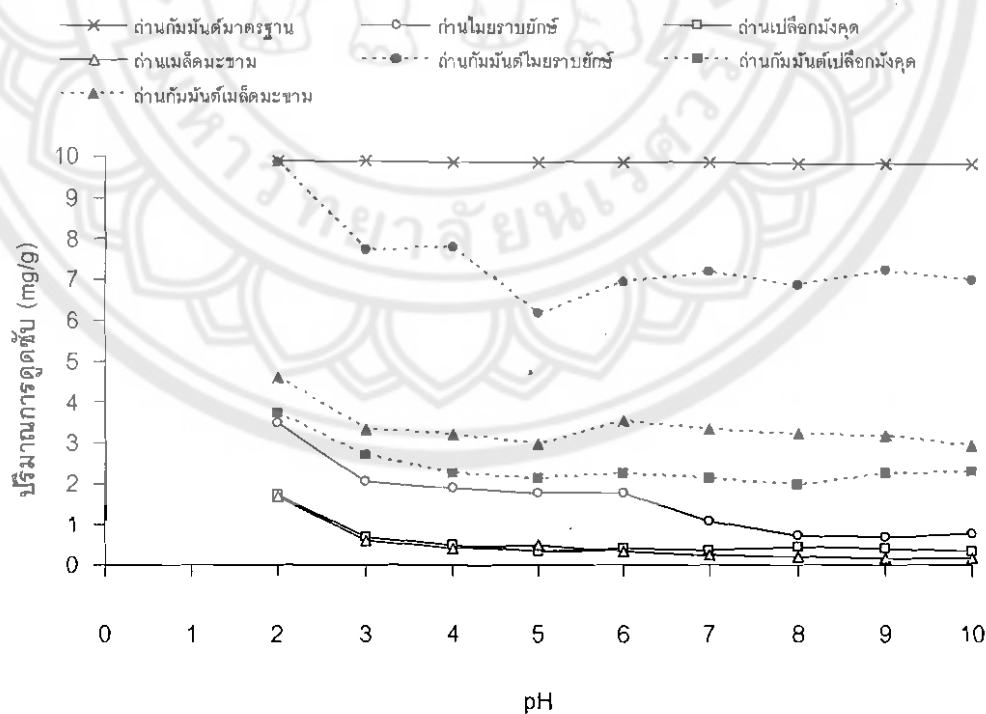
ภาพ 14 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



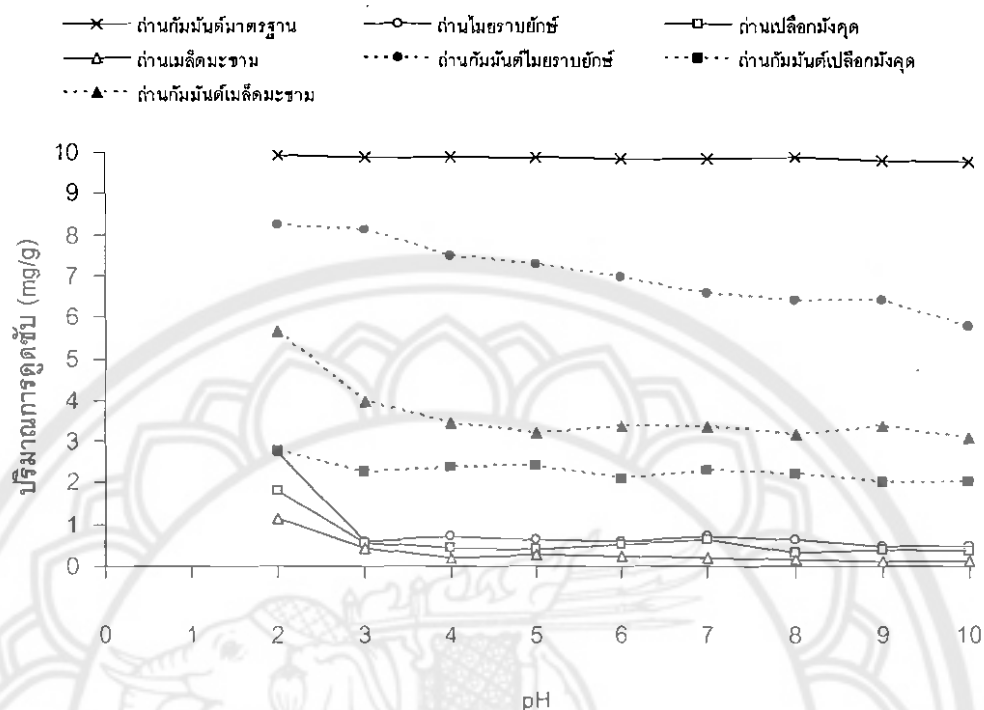
ภาพ 15 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



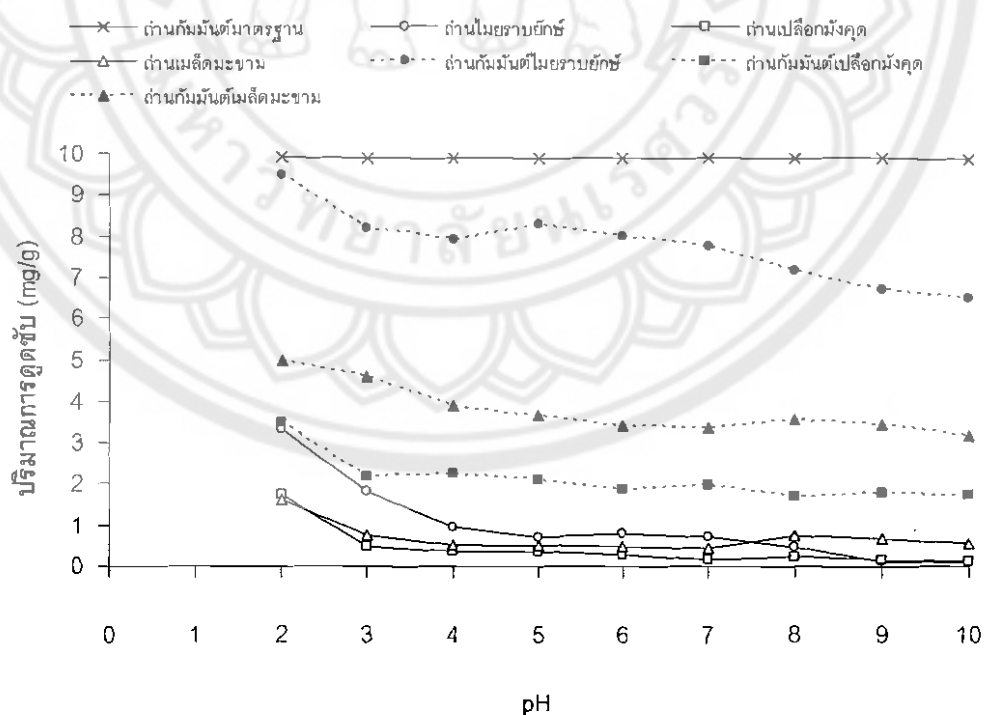
ภาพ 16 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย สีข้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



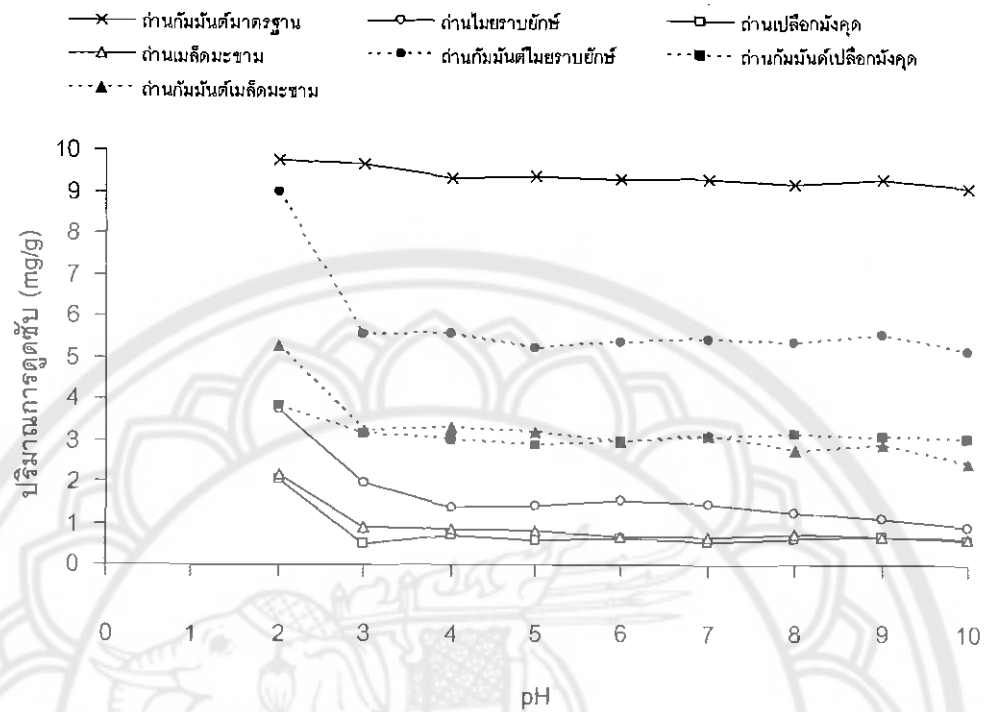
ภาพ 17 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย สีข้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



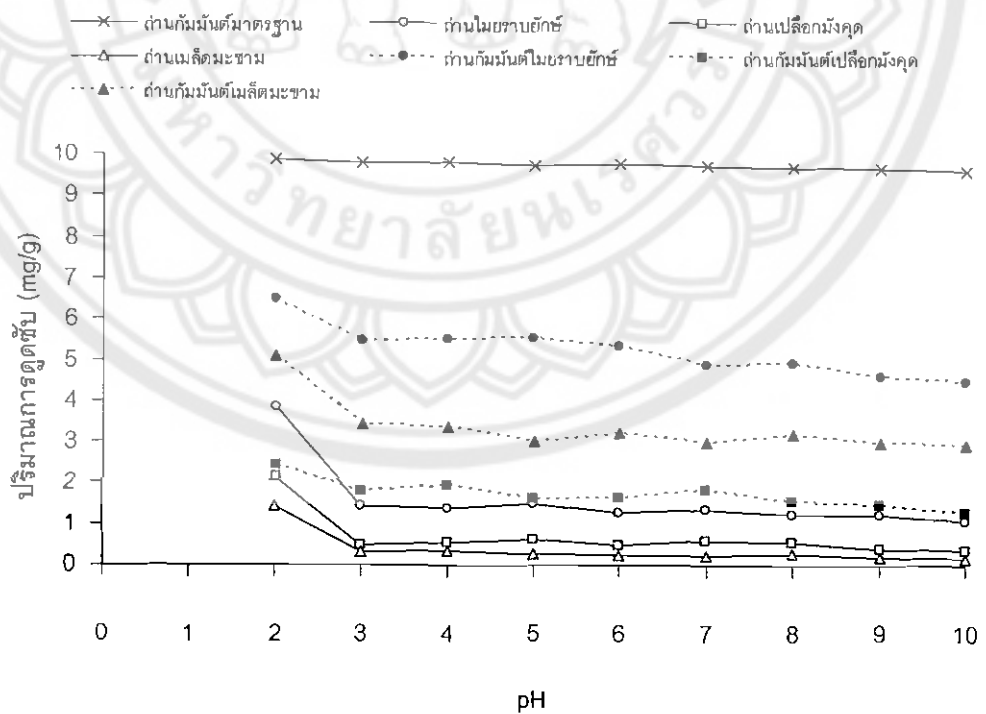
ภาพ 18 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



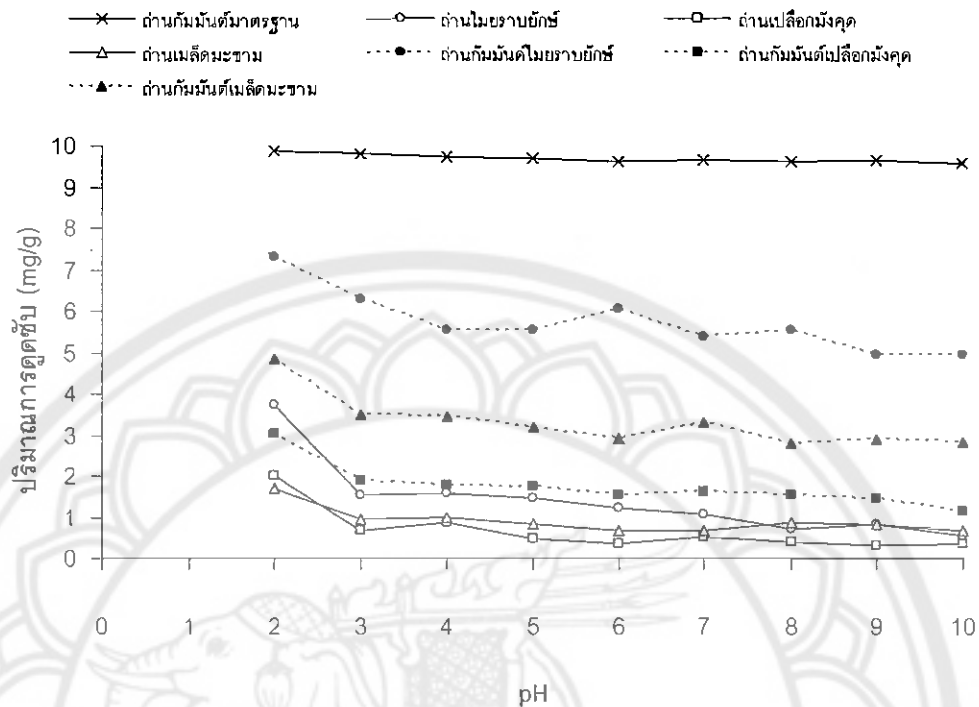
ภาพ 19 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพ 20 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย
สีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



ภาพ 21 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย
สีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

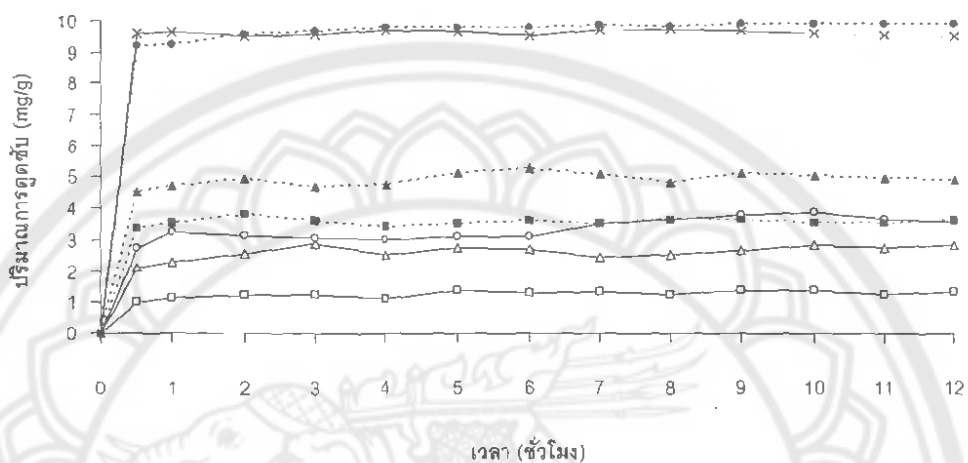


ภาพ 22 ปริมาณการดูดซับของการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการศึกษาเวลา และอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม

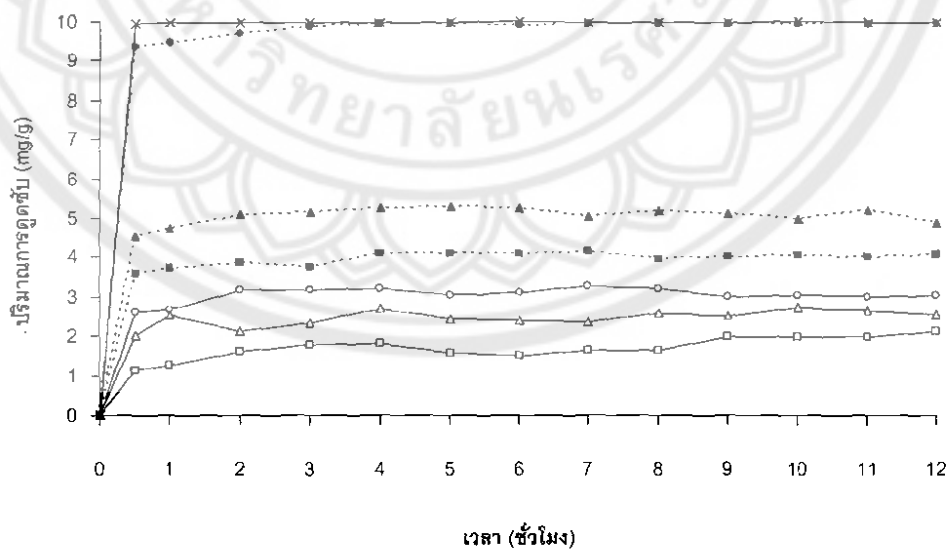
จากการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลในการดูดซับสารละลายสีย้อม สีเหลือง สีแดง และ สีนํ้าเงิน ด้วยถ่านและถ่านกัมมันต์เตรียมจากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์มาตรฐาน โดยใช้สารละลายที่ pH 2 และอุณหภูมิในการดูดซับที่ 20 °C, 30 °C และ 40 °C ซึ่งทำการศึกษา 13 ช่วงเวลา คือที่เวลา 30 นาที และ 1-12 ชั่วโมง พบว่าเวลาเริ่มต้นที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของ ถ่านกัมมันต์มาตรฐานคือที่เวลา 30 นาที ซึ่งเร็วกว่า และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทุกชนิดที่เข้าสู่สภาวะ สมดุลที่เวลาประมาณ 1-3 ชั่วโมง สำหรับถ่านกัมมันต์ ไมยราบยักษ์นั้นเข้าสู่สภาวะสมดุลช้า ที่สุด คือที่เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้สูงเช่นเดียวกับ ถ่านกัม มันต์มาตรฐาน ส่วนผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับนั้น พบมีความแตกต่างกันไปตามโทน สีและประเภทของตัว ดูดซับ ดังแสดงในภาพ 23-31

- x— ด้านกัมมันต์มาตรฐาน
- o— ด้านไมยราบยักษ์
- ด้านเปลือกมังคุด
- △— ด้านเมล็ดมะขาม
- ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด
- ▲— ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

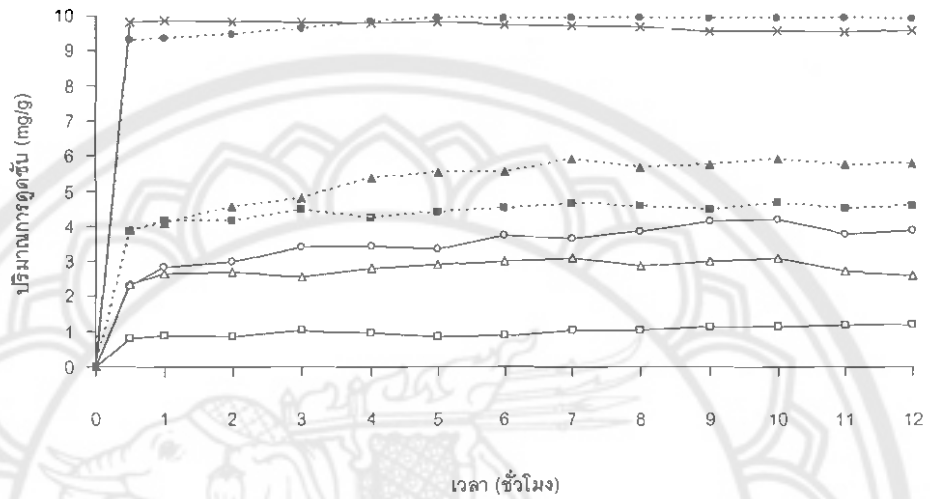
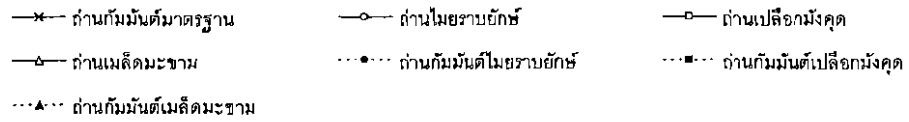


ภาพ 23 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

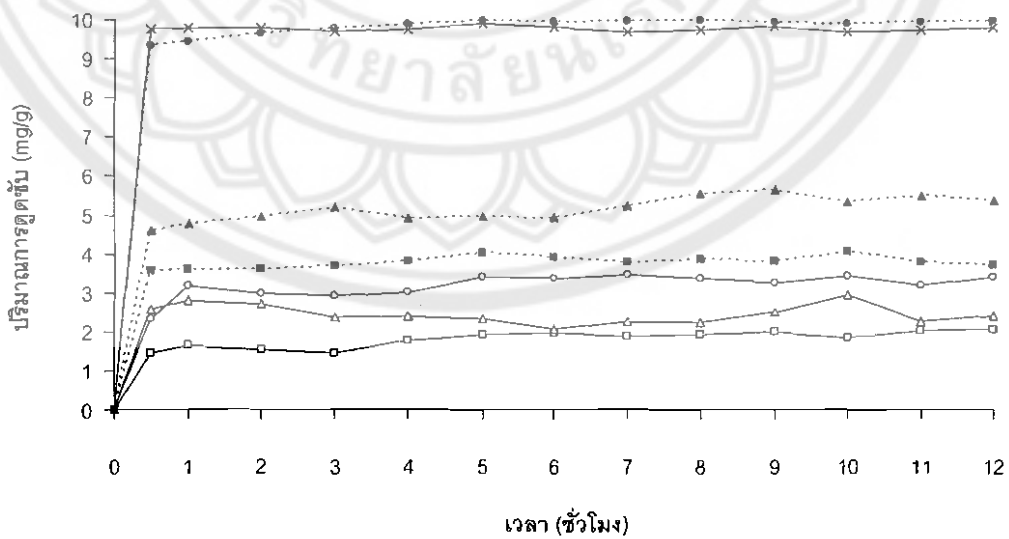
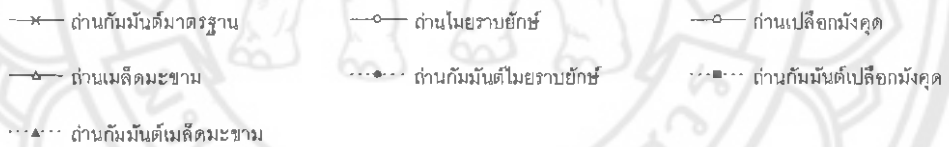
- x— ด้านกัมมันต์มาตรฐาน
- o— ด้านไมยราบยักษ์
- ด้านเปลือกมังคุด
- △— ด้านเมล็ดมะขาม
- ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด
- ▲— ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



ภาพ 24 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

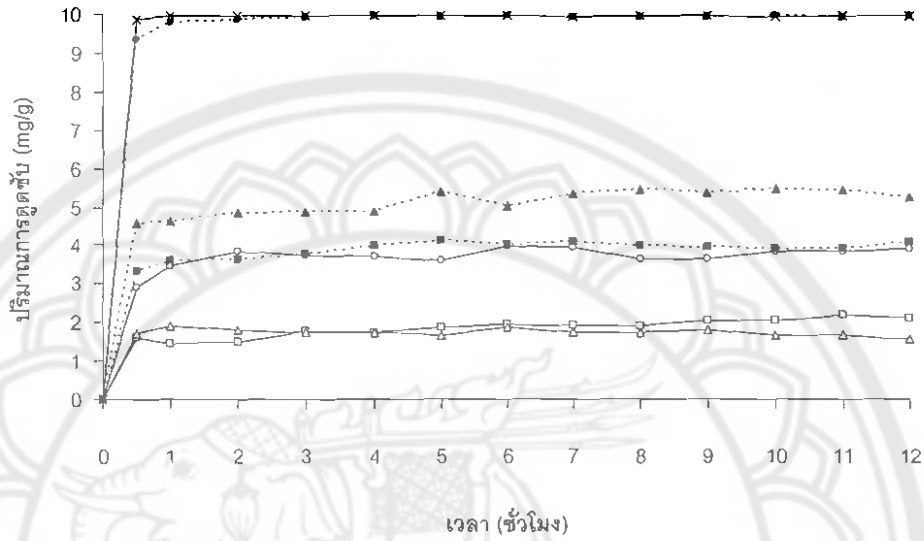


ภาพ 25 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลายสีข้อมส้เหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



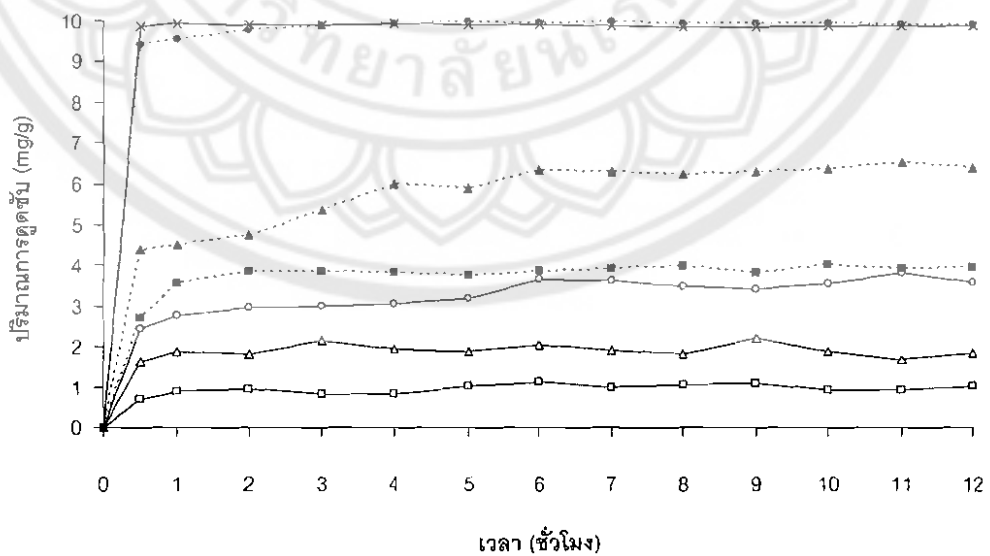
ภาพ 26 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลายสีข้อมส้แดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

- x— ด้านกัมมันต์มาตรฐาน
- ด้านไมยราบยักษ์
- ด้านเปลือกม้งคูด
- △— ด้านเมล็ดมะขาม
- ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ด้านกัมมันต์เปลือกม้งคูด
- ▲— ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

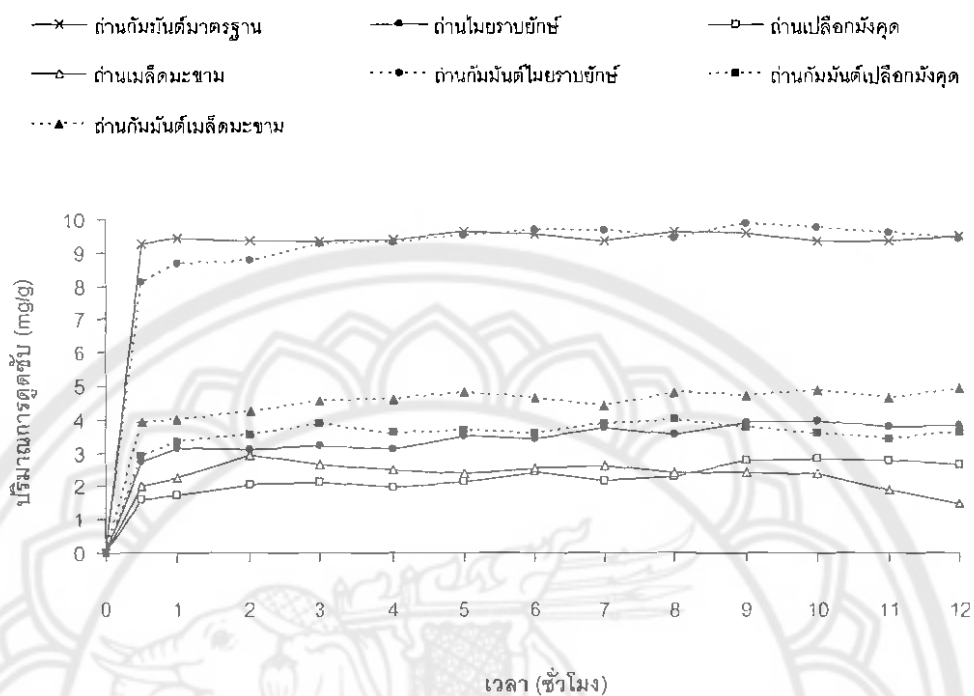


ภาพ 27 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

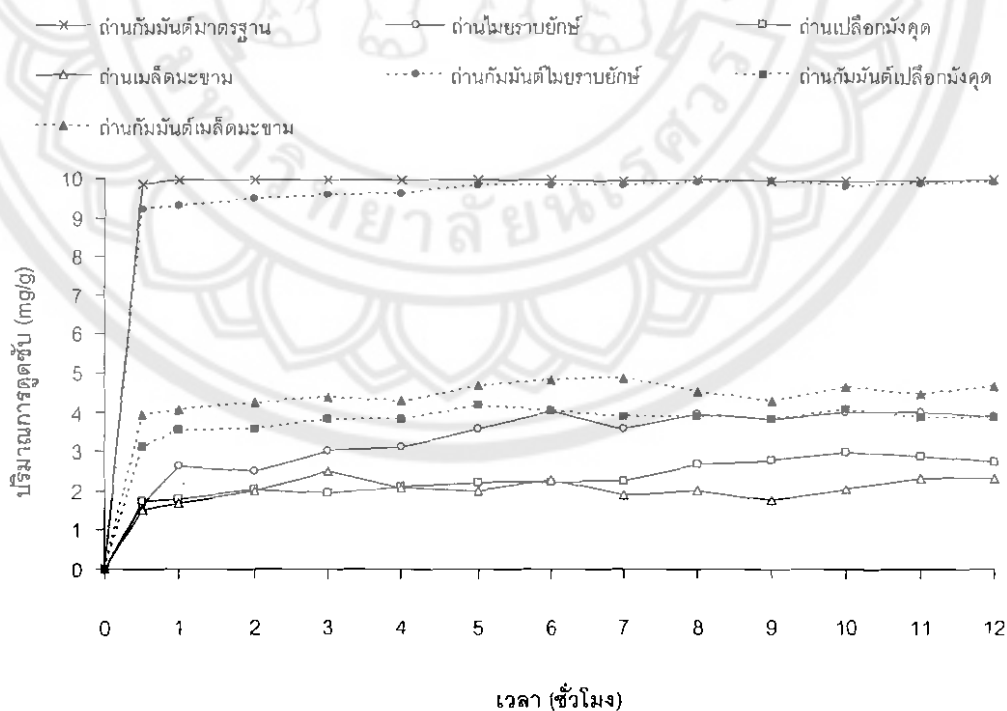
- x— ด้านกัมมันต์มาตรฐาน
- ด้านไมยราบยักษ์
- ด้านเปลือกม้งคูด
- △— ด้านเมล็ดมะขาม
- ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ด้านกัมมันต์เปลือกม้งคูด
- ▲— ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



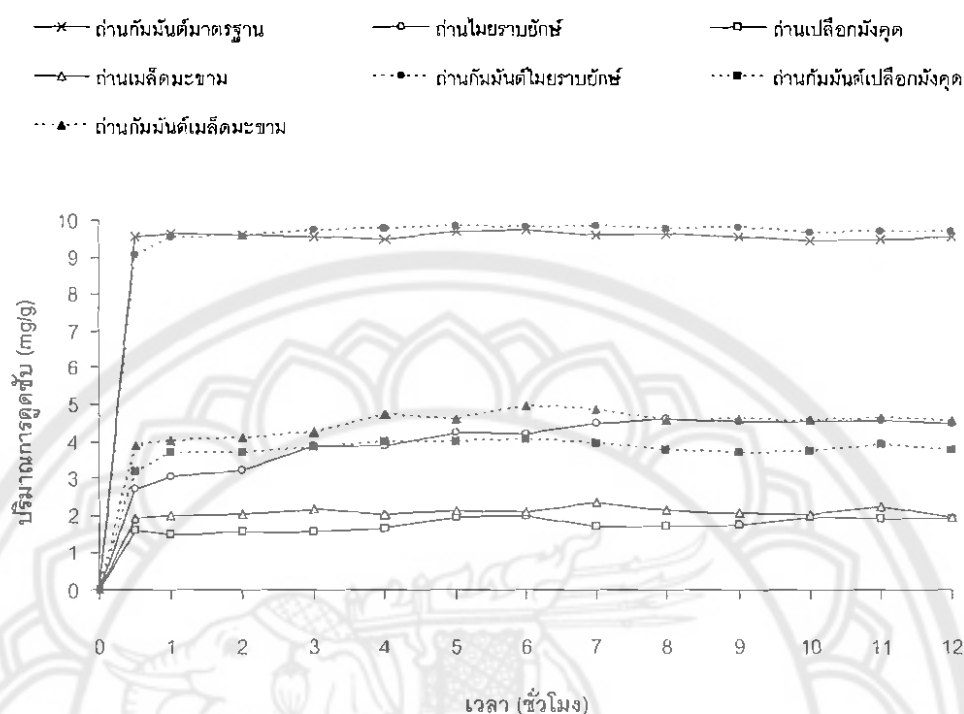
ภาพ 28 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพ 29 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



ภาพ 30 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

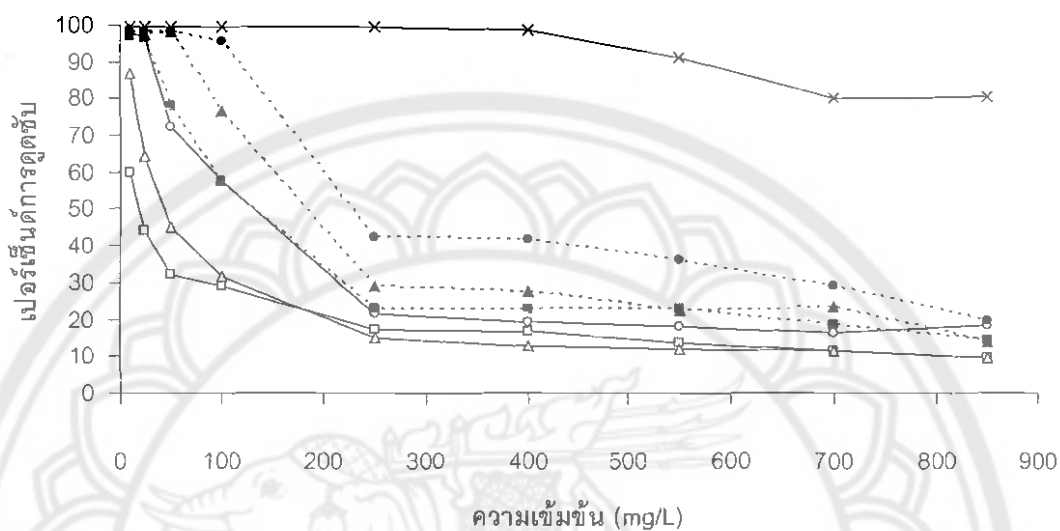


ภาพ 31 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

4.4 ผลการศึกษาความเข้มข้น และอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม

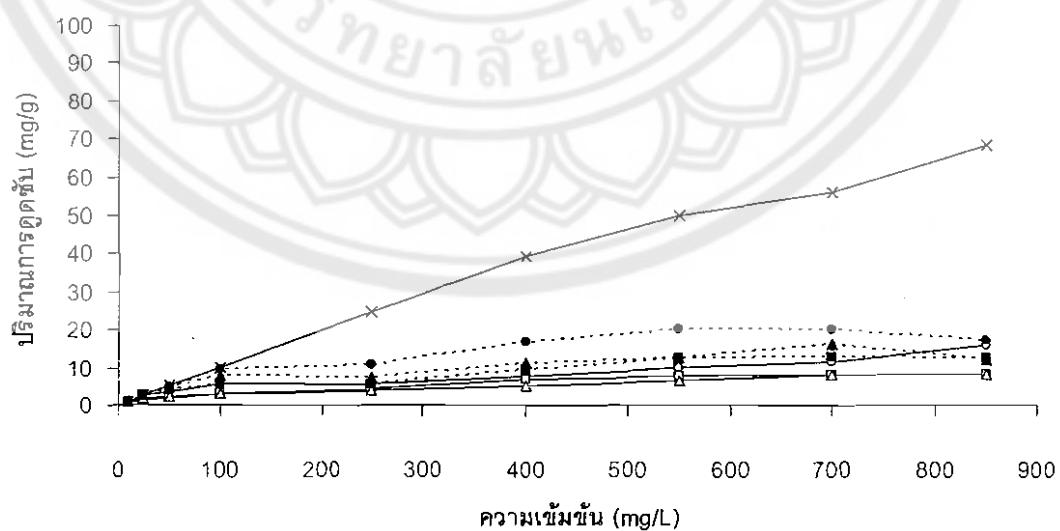
จากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม สีเหลือง สีแดง และ สีน้ำเงิน โดยใช้ความเข้มข้น 10, 25, 50, 100, 250, 400, 550, 700 และ 850 mg/L เวลาที่ใช้ในการดูดซับด้วยด้านกัมมันต์มาตรฐาน ด้านและด้านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม คือที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ ในการดูดซับสารละลายสีย้อมใช้สารละลายที่ pH 2 และอุณหภูมิในการดูดซับที่ 20 °C 30 °C และ 40 °C จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์ในการดูดซับของตัวดูดซับทุกชนิดลดลง ยกเว้นด้านกัมมันต์มาตรฐาน ที่สามารถดูดซับได้ดีทุกความเข้มข้น ส่วนปริมาณการดูดซับของสารด้วยตัวดูดซับทุกชนิดจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมสูงขึ้น สำหรับการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้นพบว่าผลการดูดซับไม่แตกต่างกัน (ภาพ 32-49)

- × ด้านกัมมันต์มาตรฐาน ○ ด้านไมยราบยักษ์ □ ด้านเปลือกมังคุด
 △ ด้านเมล็ดมะขาม ● ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ ■ ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด
 ▲ ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



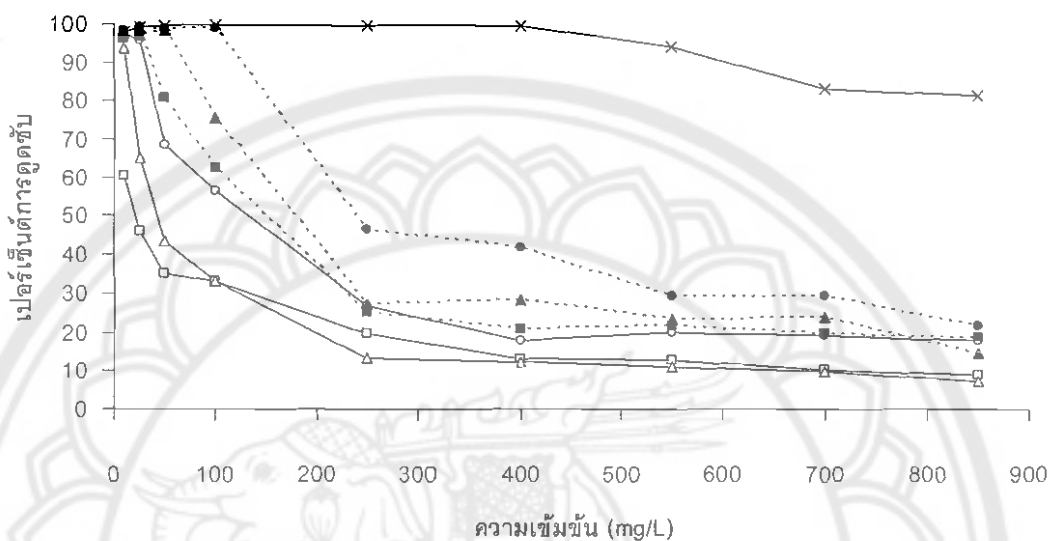
ภาพ 32 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

- × ด้านกัมมันต์มาตรฐาน ○ ด้านไมยราบยักษ์ □ ด้านเปลือกมังคุด
 △ ด้านเมล็ดมะขาม ● ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ ■ ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด
 ▲ ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



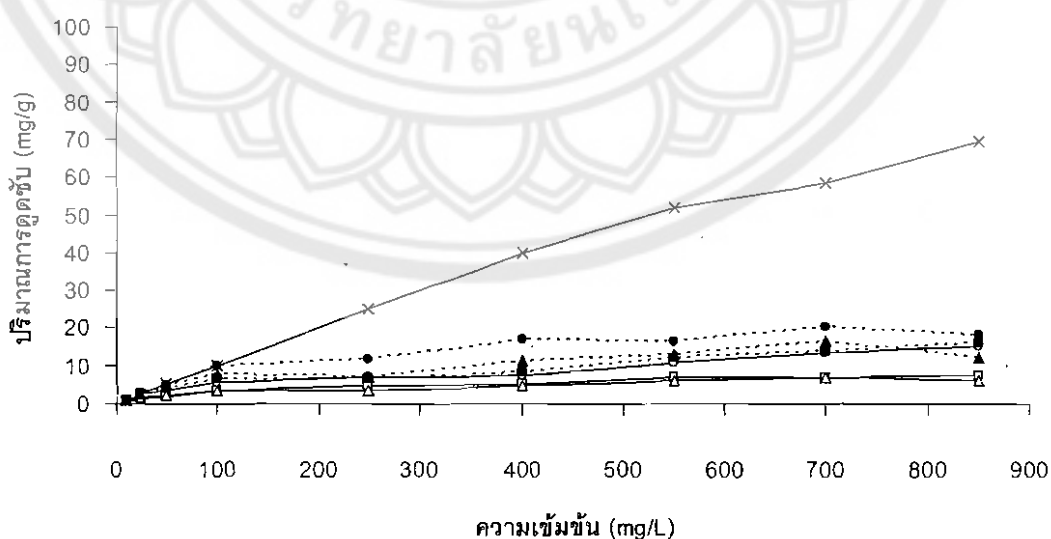
ภาพ 33 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

- ×— ต่ำนกั่มมันต์มาตรฐาน —○— ต่ำนไมยราบยักร์ —□— ต่ำนเปลือกม้งคุด
 —△— ต่ำนเมล็ดมะขาม -·-·- ต่ำนกั่มมันต์ไมยราบยักร์ -·-·- ต่ำนกั่มมันต์เปลือกม้งคุด
 -·-·-▲-·- ต่ำนกั่มมันต์เมล็ดมะขาม



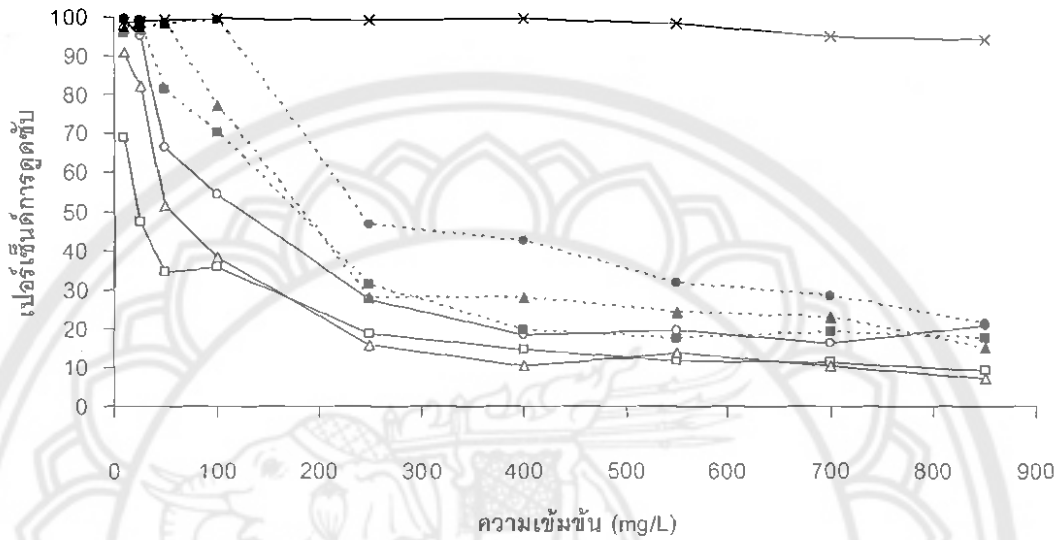
ภาพ 34 เปอร์เซนต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- ×— ต่ำนกั่มมันต์มาตรฐาน —○— ต่ำนไมยราบยักร์ —□— ต่ำนเปลือกม้งคุด
 —△— ต่ำนเมล็ดมะขาม -·-·- ต่ำนกั่มมันต์ไมยราบยักร์ -·-·- ต่ำนกั่มมันต์เปลือกม้งคุด
 -·-·-▲-·- ต่ำนกั่มมันต์เมล็ดมะขาม



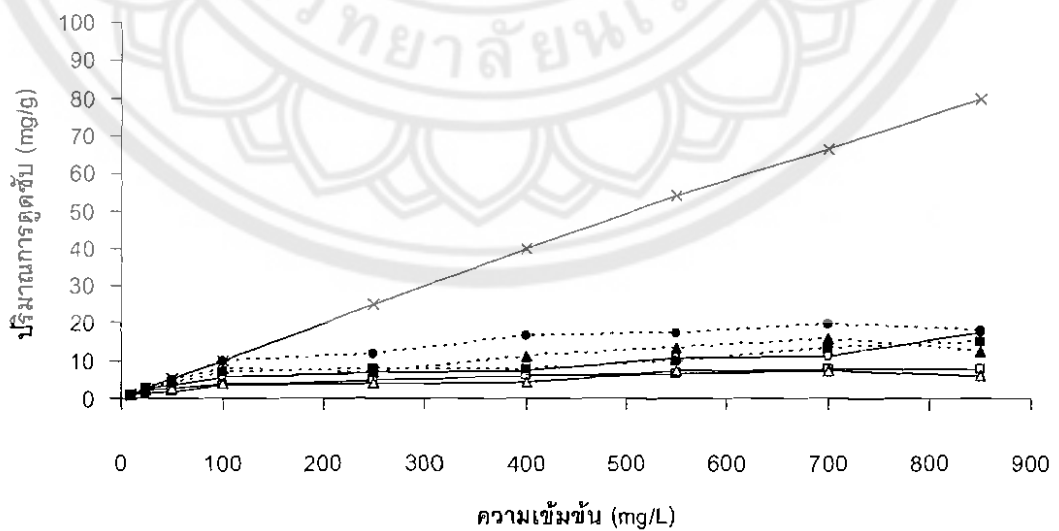
ภาพ 35 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- ×— ด่านกัมมันต์มาตรฐาน —○— ด่านไมยราบยักษ์ —□— ด่านเปลือกมังคุด
 —△— ด่านเมล็ดมะขาม -●- - ด่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ -■- - ด่านกัมมันต์เปลือกมังคุด
 -▲- - ด่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



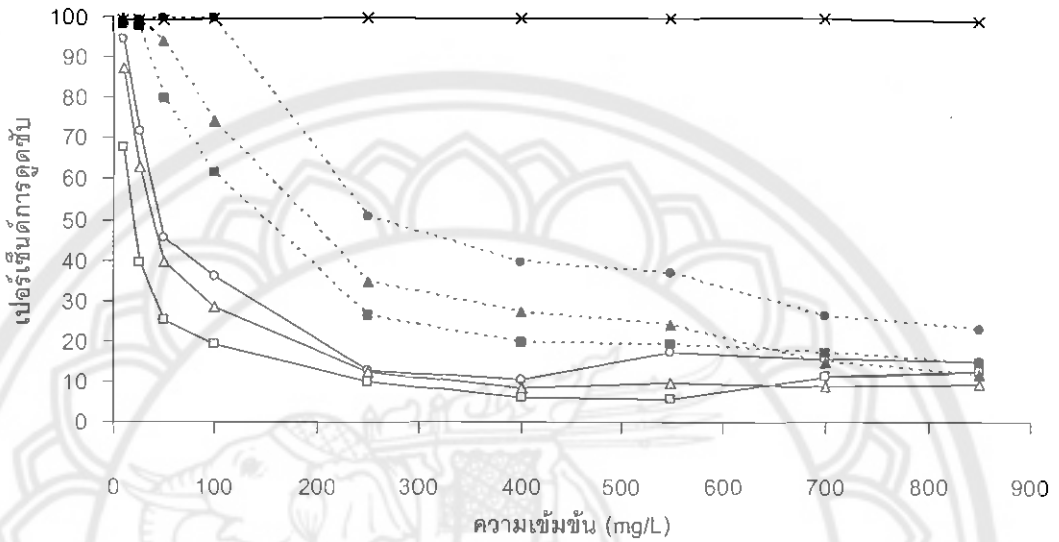
ภาพ 36 เปอร์เซนต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีข้อม สีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- ×— ด่านกัมมันต์มาตรฐาน —○— ด่านไมยราบยักษ์ —□— ด่านเปลือกมังคุด
 —△— ด่านเมล็ดมะขาม -●- - ด่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ -■- - ด่านกัมมันต์เปลือกมังคุด
 -▲- - ด่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



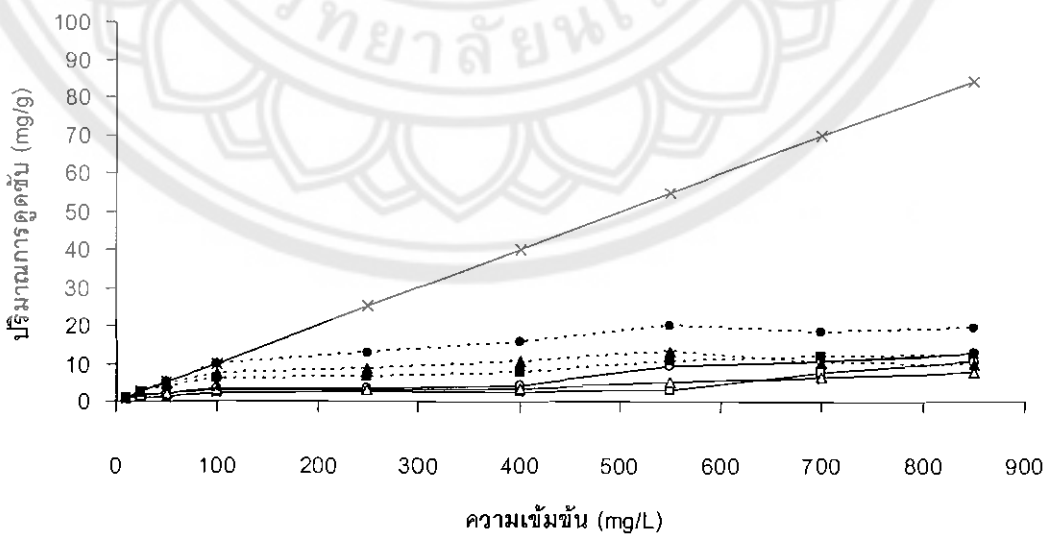
ภาพ 37 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีข้อม สีเหลือง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน
- ถ่านไมยราบยักษ์
- ถ่านเปลือกมังคุด
- ถ่านเมล็ดมะขาม
- ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด
- ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

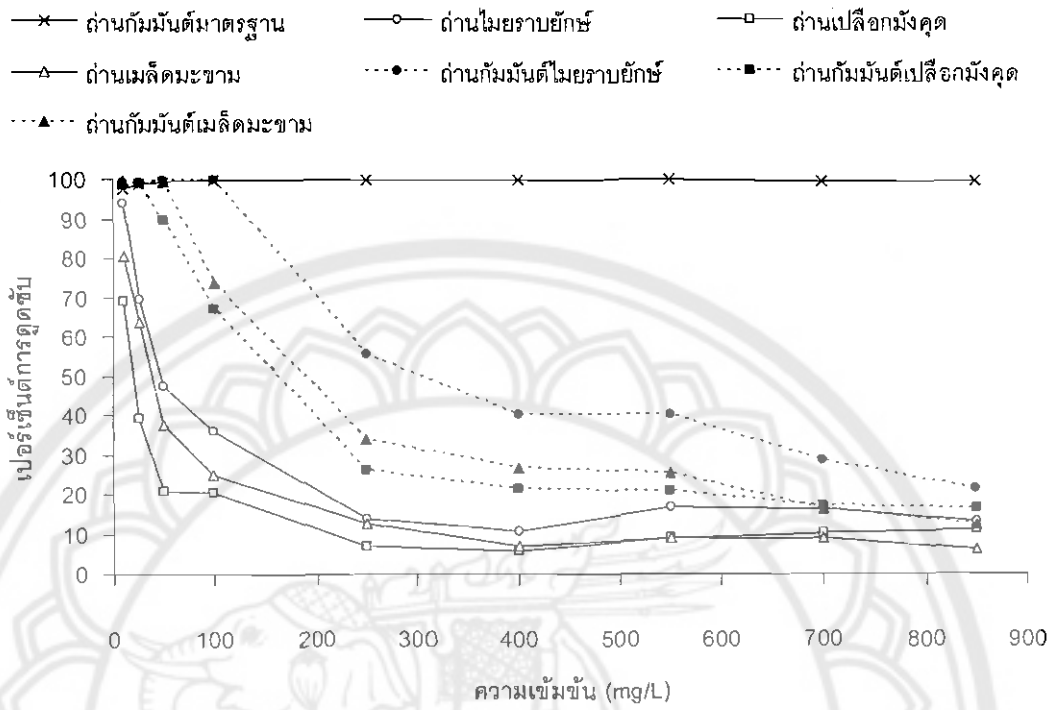


ภาพ 38 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อม สีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

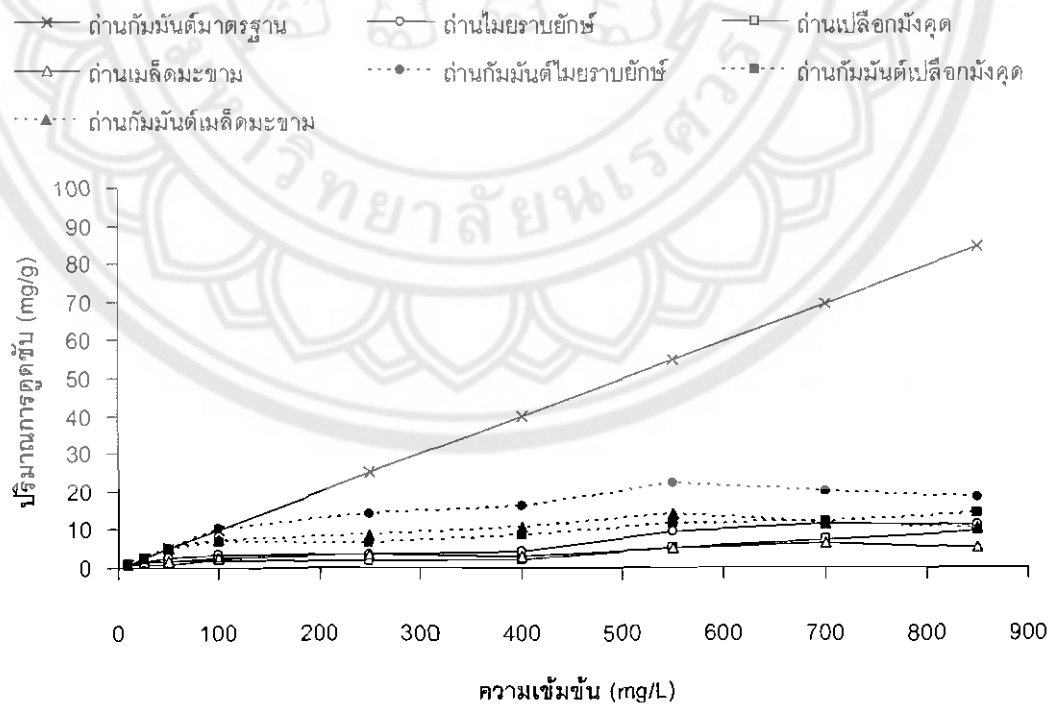
- ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน
- ถ่านไมยราบยักษ์
- ถ่านเปลือกมังคุด
- ถ่านเมล็ดมะขาม
- ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด
- ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



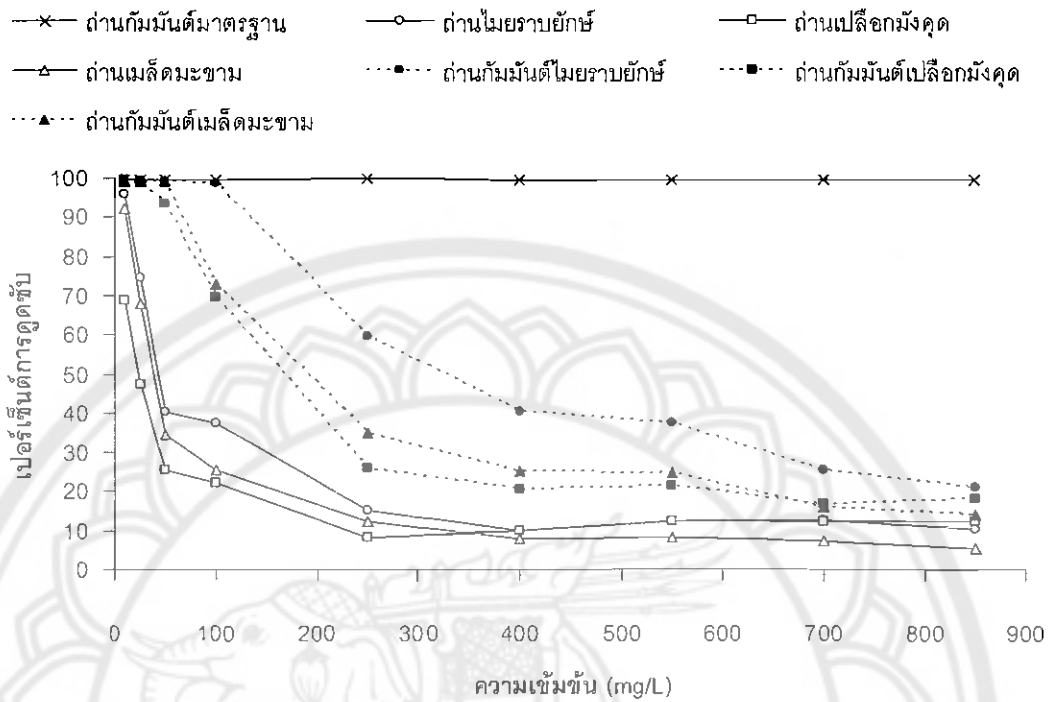
ภาพ 39 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อม สีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



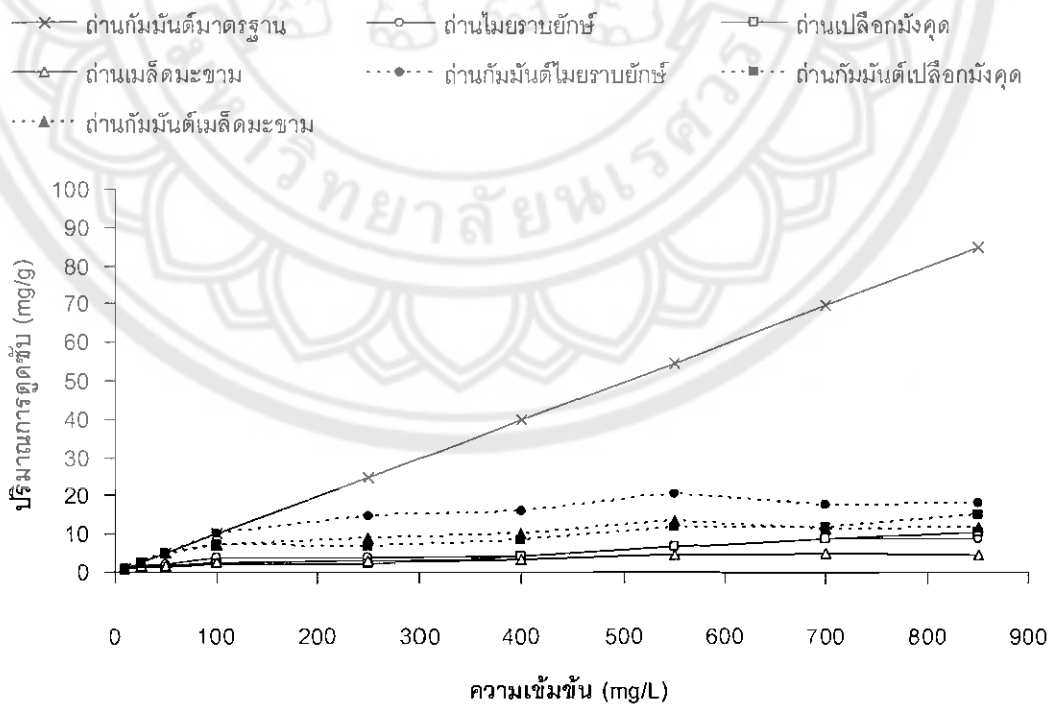
ภาพ 40 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อม สีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



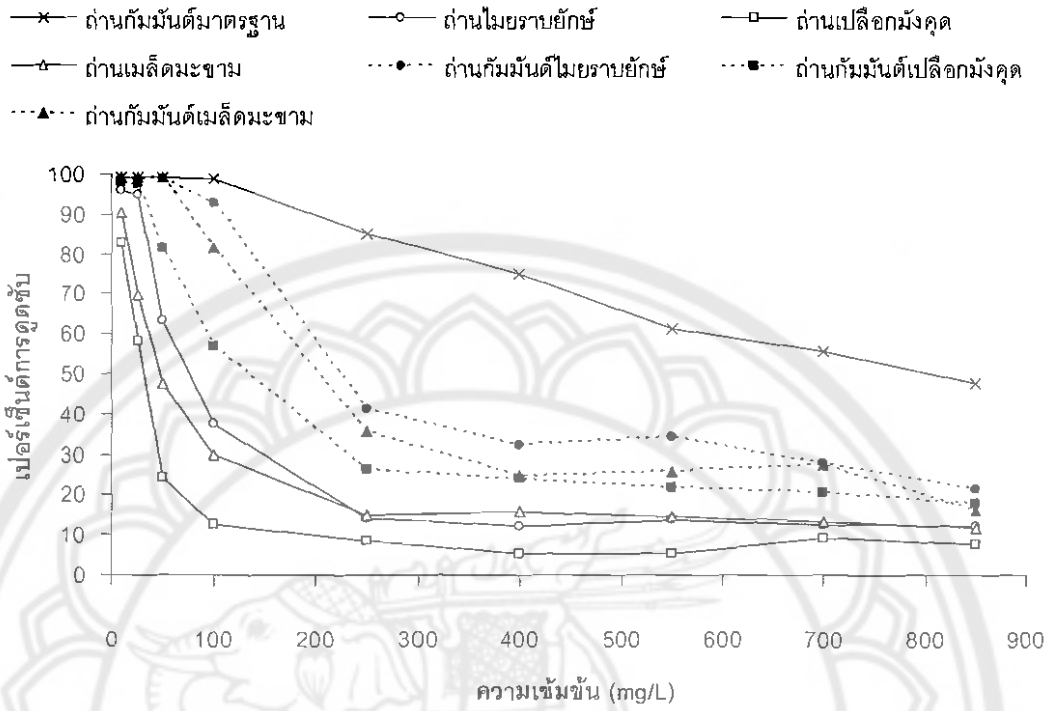
ภาพ 41 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อม สีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



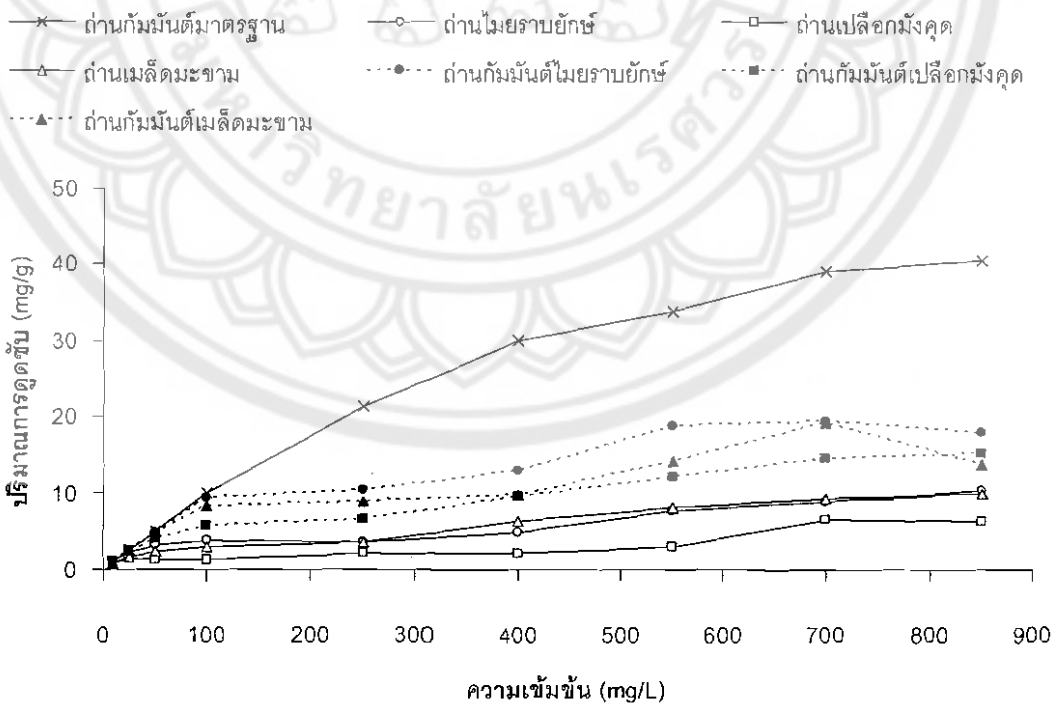
ภาพ 42 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพ 43 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีแดง ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

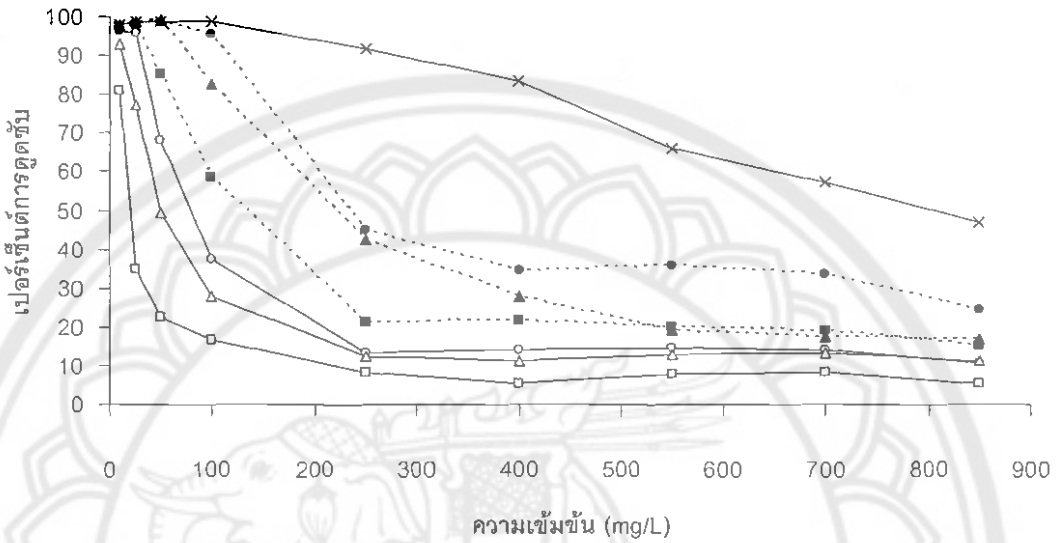


ภาพ 44 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



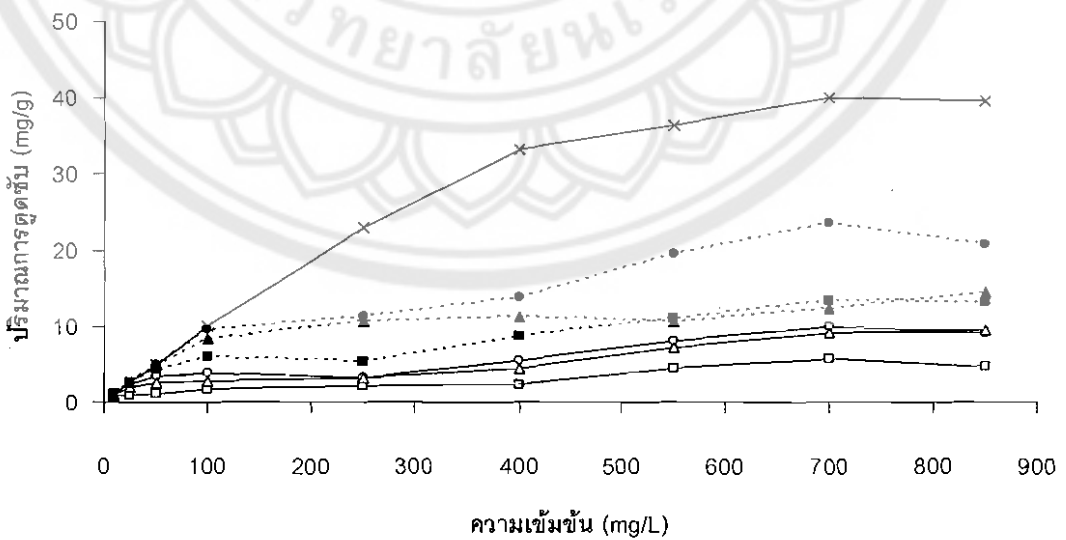
ภาพ 45 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

- ×— ด้านกัมมันต์มาตรฐาน
- ด้านไมยราบยักษ์
- ด้านเปลือกมังคุด
- △— ด้านเมล็ดมะขาม
- ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด
- ▲— ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



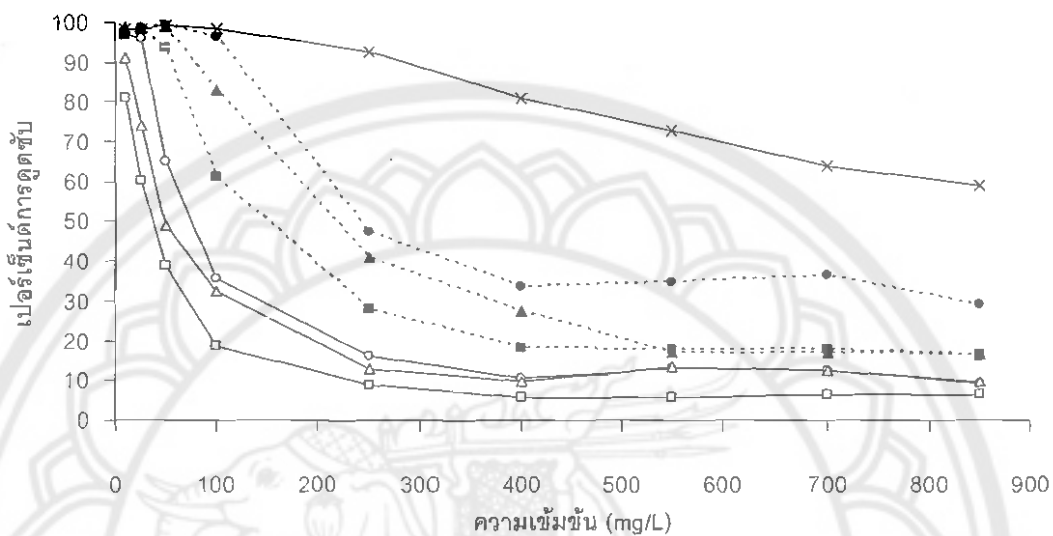
ภาพ 46 เปอร์เซนต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- ×— ด้านกัมมันต์มาตรฐาน
- ด้านไมยราบยักษ์
- ด้านเปลือกมังคุด
- △— ด้านเมล็ดมะขาม
- ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์
- ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด
- ▲— ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



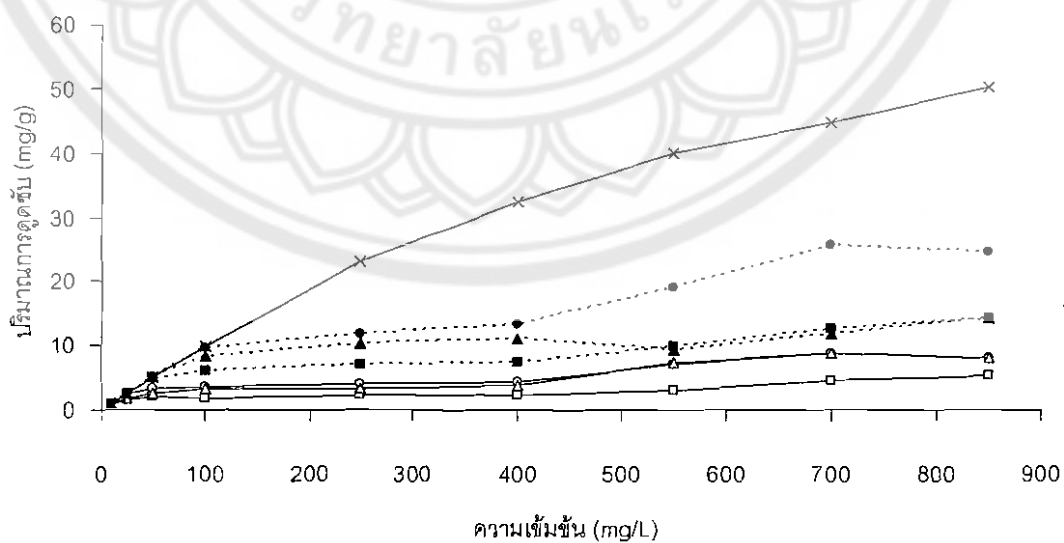
ภาพ 47 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- ×— ผ่านกัมมันต์มาตรฐาน —○— ผ่านไมยราบยักษ์ —□— ผ่านเปลือกมังคุด
 —△— ผ่านเมล็ดมะขาม ····●··· ผ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ ····■··· ผ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด
 ····▲··· ผ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



ภาพ 48 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- ×— ผ่านกัมมันต์มาตรฐาน —○— ผ่านไมยราบยักษ์ —□— ผ่านเปลือกมังคุด
 —△— ผ่านเมล็ดมะขาม ····●··· ผ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ ····■··· ผ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด
 ····▲··· ผ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



ภาพ 49 ปริมาณการดูดซับของการศึกษาความเข้มข้น ในการดูดซับสารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

4.5 ผลการศึกษาไอโซเทอม และอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม

จากผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม สีเหลือง สีแดง และ สีนํ้าเงิน โดยให้ความเข้มข้น 10, 25, 50, 100, 250, 400, 550, 700 และ 850 mg/L เวลาที่ใช้ในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ถ่านและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม คือที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ ในการดูดซับสารละลายสีย้อมใช้สารละลายที่ pH 2 และอุณหภูมิในการดูดซับที่ 20 °C, 30 °C และ 40 °C จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาศึกษา ตามสมการไอโซเทอมของการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir model) และฟรอนด์ลิค (Freundlich model) ดังสมการ

สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) (ดังแสดงในสมการ (1) หน้า 25)

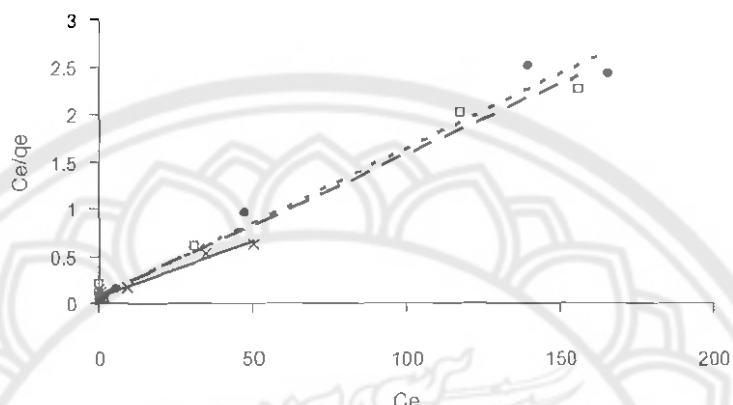
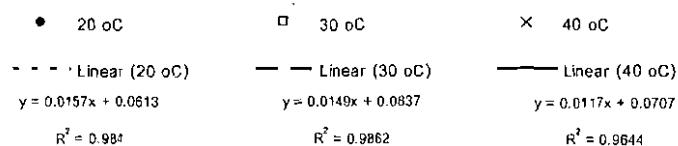
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{KX_m}$$

- เมื่อ X_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับสูงสุด
 q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังการดูดซับ (mg/L)
 K = ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

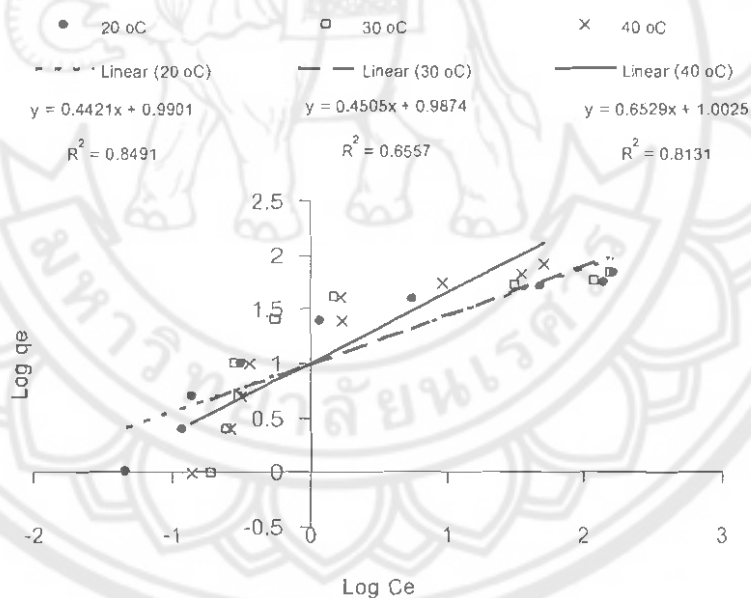
สมการฟรอนด์ลิค (Freundlich Isotherm) (ดังแสดงในสมการ (4) หน้า 26)

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

- เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังการดูดซับ (mg/L)
 q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
 K_f, n = ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

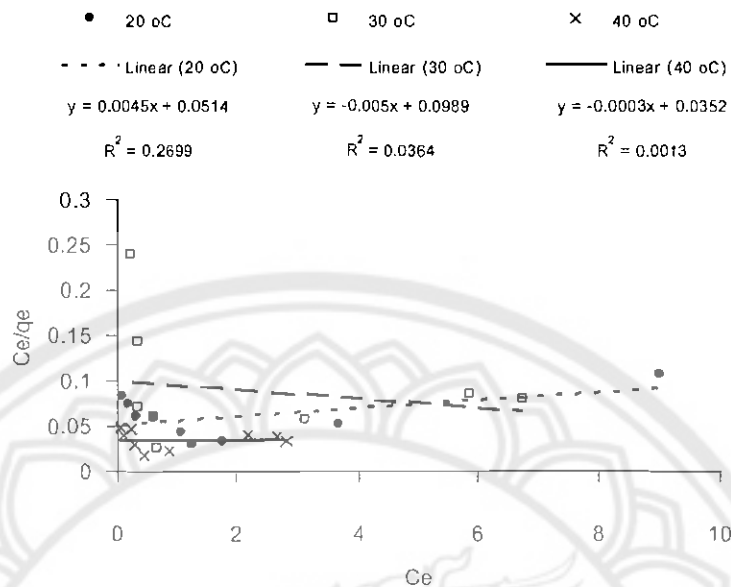


ภาพ 50 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์มาตรฐานดูดซับสีเหลือง

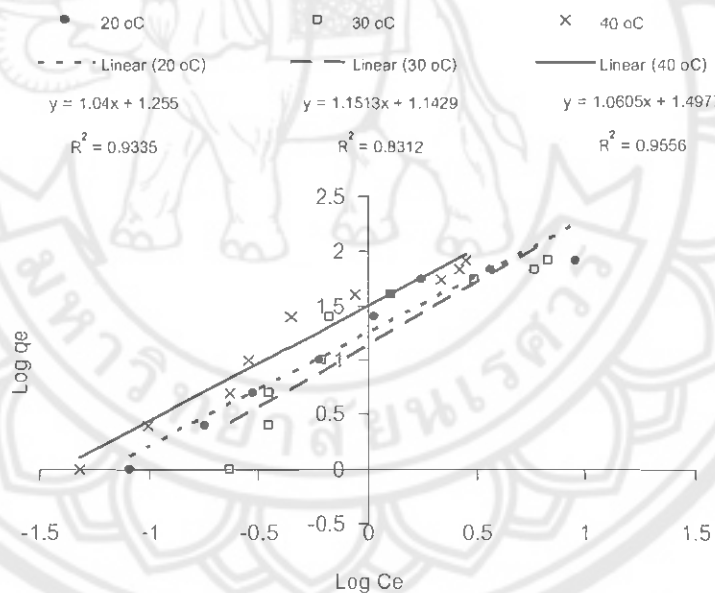


ภาพ 51 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์มาตรฐานดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 50 และ 51 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีเหลืองด้วยถ่านกัมมันต์มาตรฐาน พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9840 0.9862 และ 0.9644 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8491 0.6557 และ 0.8131 ตามลำดับ

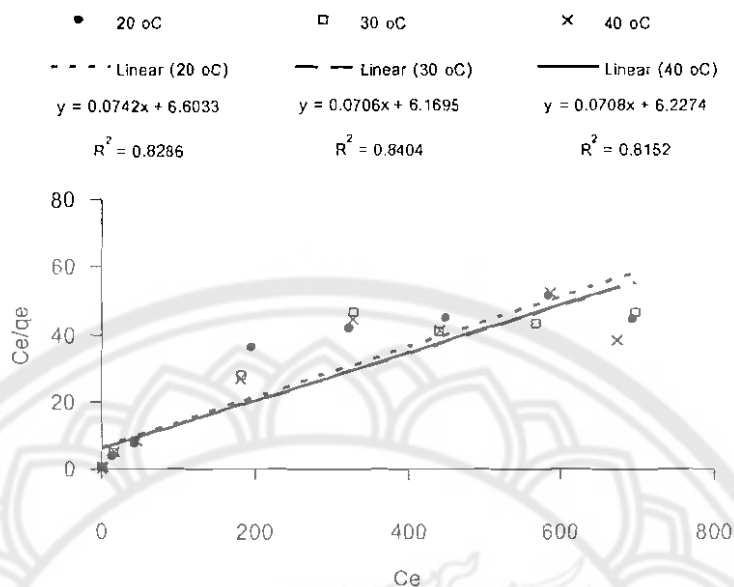


ภาพ 52 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์มาตรฐานดูดซับสีแดง

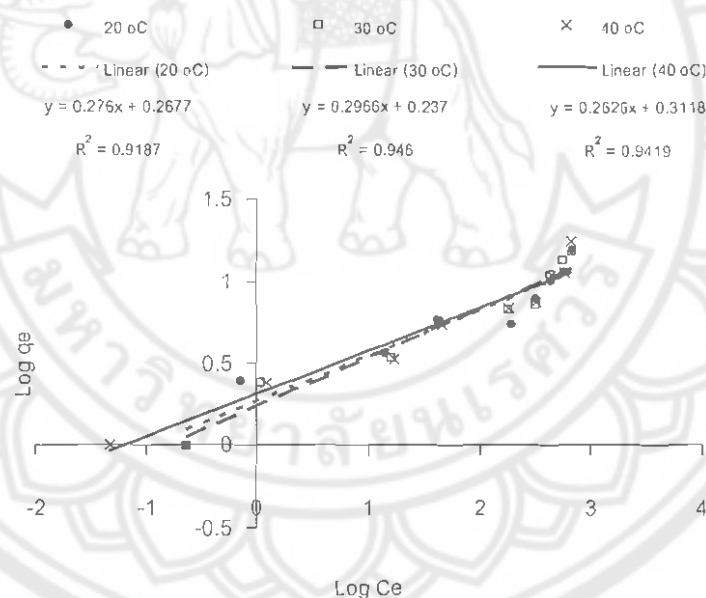


ภาพ 53 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์มาตรฐานดูดซับสีแดง

จากภาพ 52 และ 53 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีแดงด้วยถ่านกัมมันต์มาตรฐาน พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R² เท่ากับ 0.9335 0.8312 และ 0.9556 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R² จาก Langmuir model ที่มีค่าต่ำมากโดยมีค่าเท่ากับ 0.2699 0.0364 และ 0.0013 ตามลำดับ

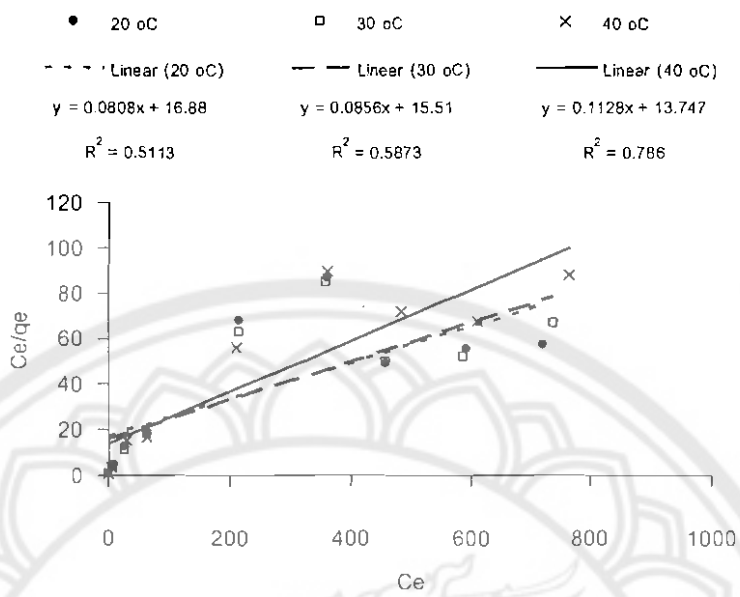


ภาพ 56 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านไมยราบยักษ์ดูดซับสีเหลือง

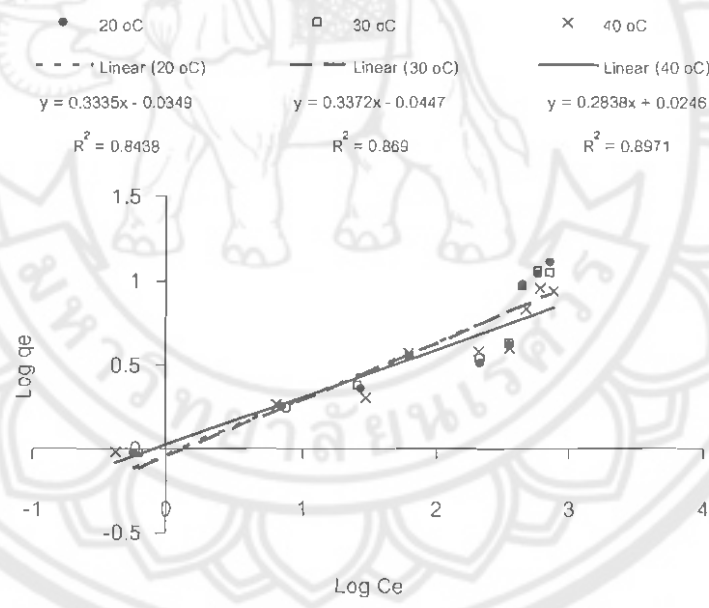


ภาพ 57 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านไมยราบยักษ์ดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 56 และ 57 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีเหลืองด้วยถ่านไมยราบยักษ์ พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9187 0.9460 และ 0.9419 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8286 0.8404 และ 0.8152 ตามลำดับ

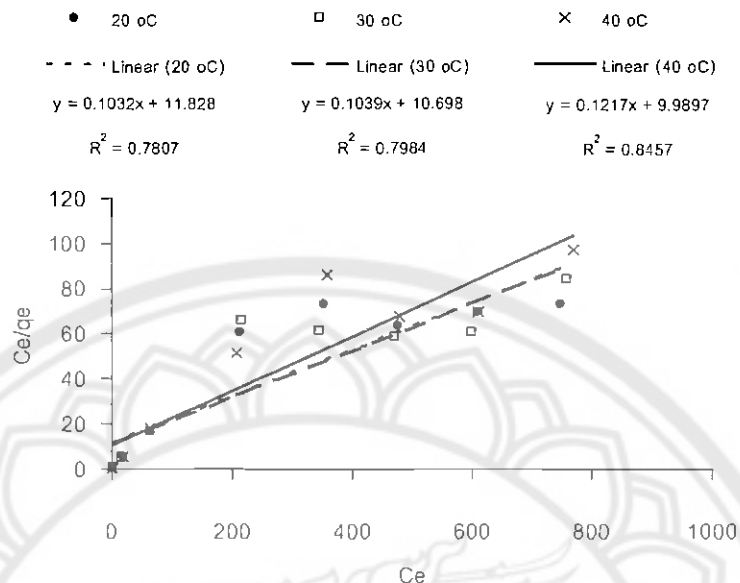


ภาพ 58 ผลการศึกษาค่า Langmuir Isotherm ของถ่านไมยราบยักษ์ดูดซับสีแดง

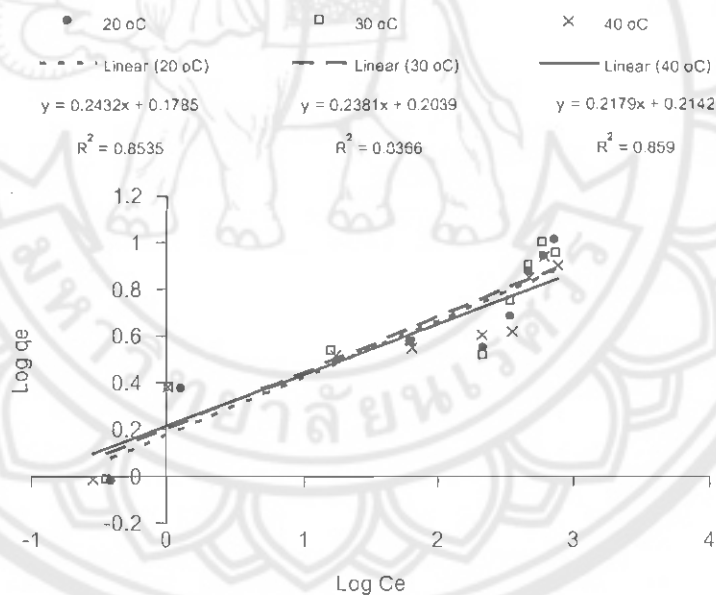


ภาพ 59 ผลการศึกษาค่า Freundlich Isotherm ของถ่านไมยราบยักษ์ดูดซับสีแดง

จากภาพ 58 และ 59 ผลการศึกษาค่า Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีแดงด้วยถ่านไมยราบยักษ์ พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R² เท่ากับ 0.8438 0.8690 และ 0.8971 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R² จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.5113 0.5873 และ 0.7860 ตามลำดับ

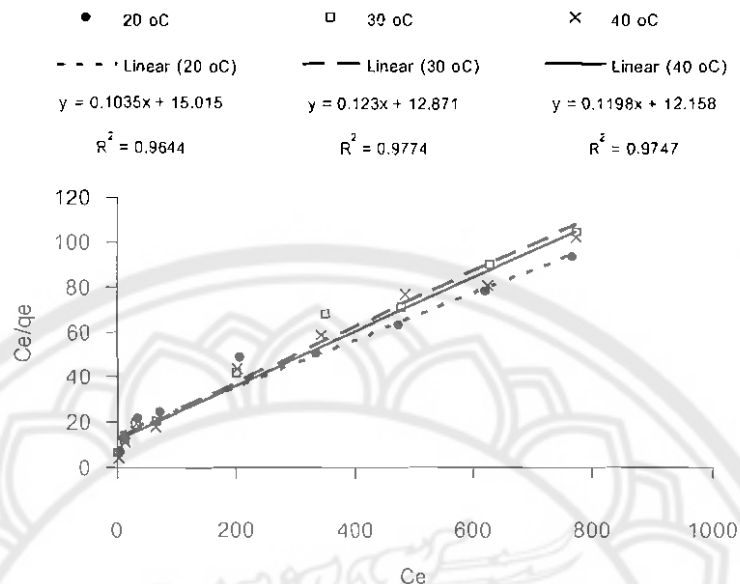


ภาพ 60 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านไมยราบยักษ์ดูดซับสีน้ำเงิน

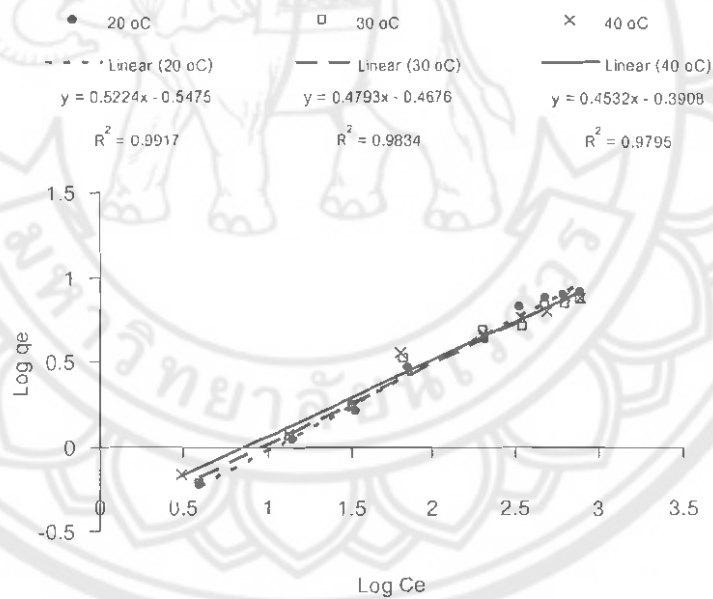


ภาพ 61 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านไมยราบยักษ์ดูดซับสีน้ำเงิน

จากภาพ 60 และ 61 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงินด้วยถ่านไมยราบยักษ์ พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8535 0.8366 และ 0.8590 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.7807 0.7984 และ 0.8457 ตามลำดับ

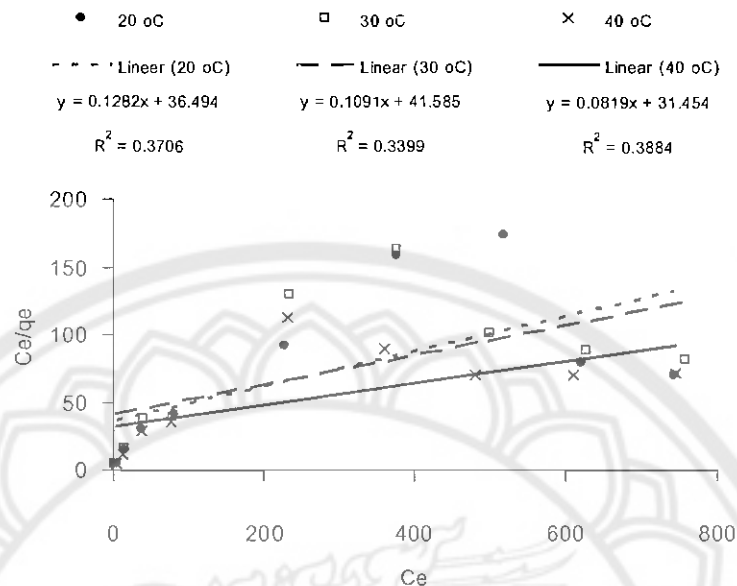


ภาพ 62 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านเปลือกมังคุดดูดซับสีเหลือง

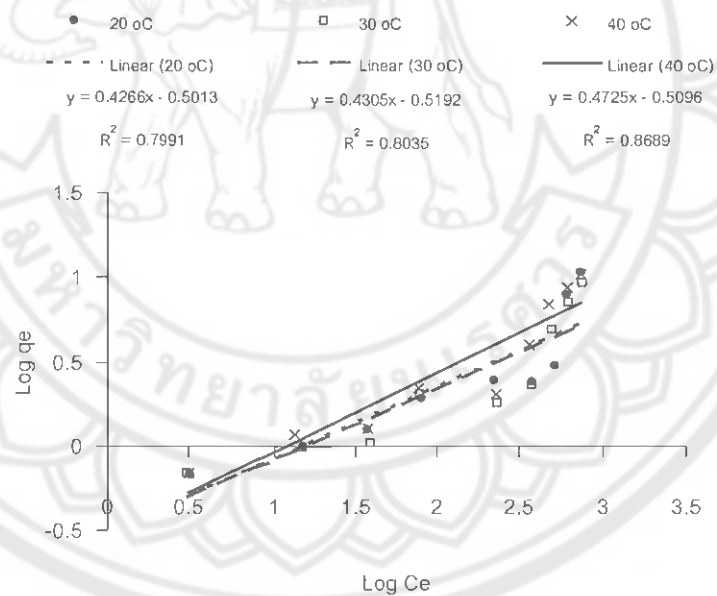


ภาพ 63 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านเปลือกมังคุดดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 62 และ 63 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีเหลืองด้วยถ่านเปลือกมังคุด พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 ไม่แตกต่างกัน โดย Langmuir model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9644 0.9774 และ 0.9747 ตามลำดับ ส่วน Freundlich model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9917 0.9834 และ 0.9795 ตามลำดับ

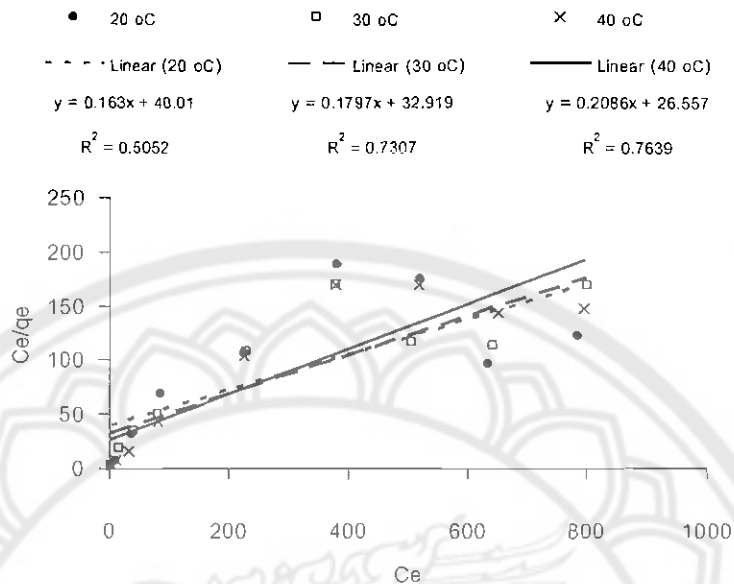


ภาพ 64 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านเปลือกมังคุดดูดซับสีแดง

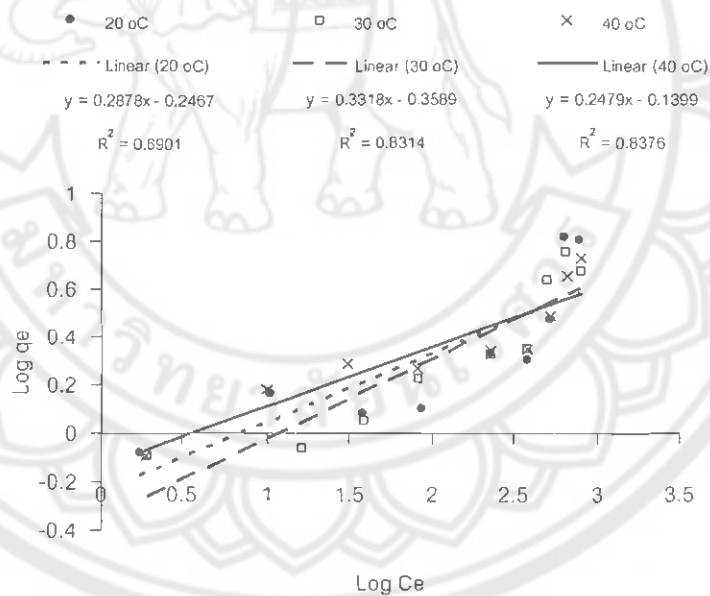


ภาพ 65 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านเปลือกมังคุดดูดซับสีแดง

จากภาพ 64 และ 65 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับด้วยถ่านเปลือกมังคุด พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7991 0.8035 และ 0.8689 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.3706 0.3399 และ 0.3884 ตามลำดับ

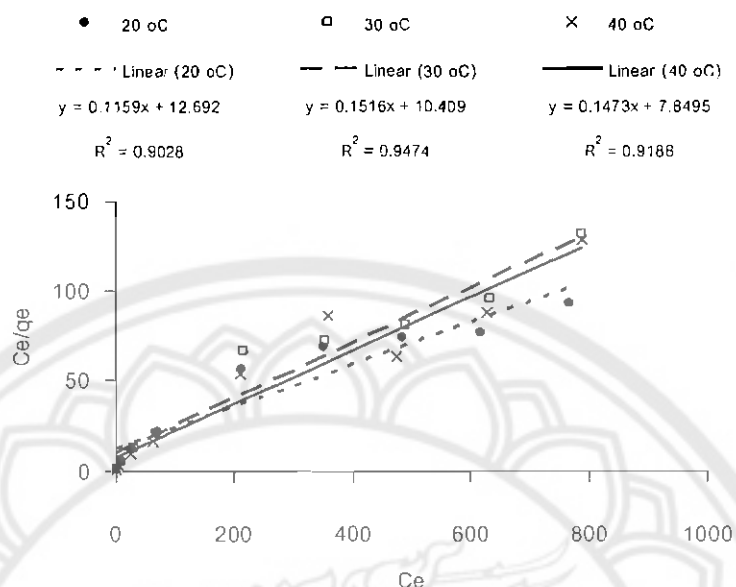


ภาพ 66 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านเปลือกมังคุดดูดซับสีน้ำเงิน

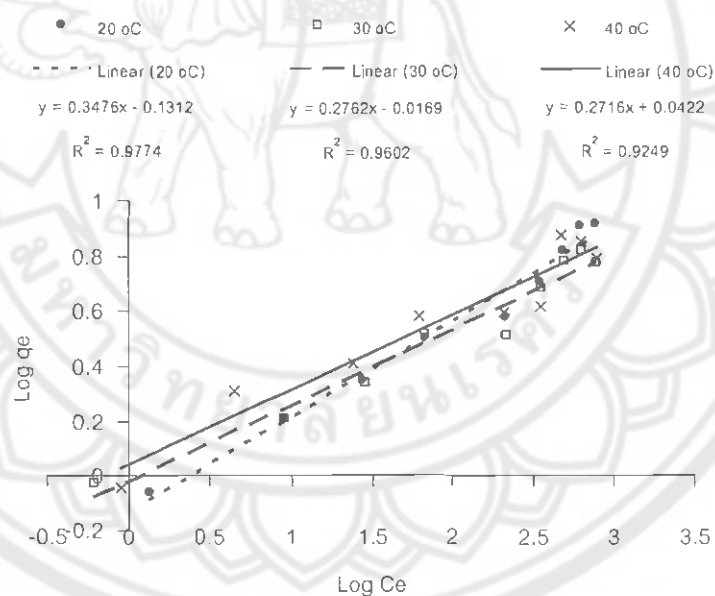


ภาพ 67 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านเปลือกมังคุดดูดซับสีน้ำเงิน

จากภาพ 66 และ 67 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีน้ำเงินด้วยถ่านเปลือกมังคุด พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.6901 0.8314 และ 0.8376 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.5052 0.7307 และ 0.7639 ตามลำดับ

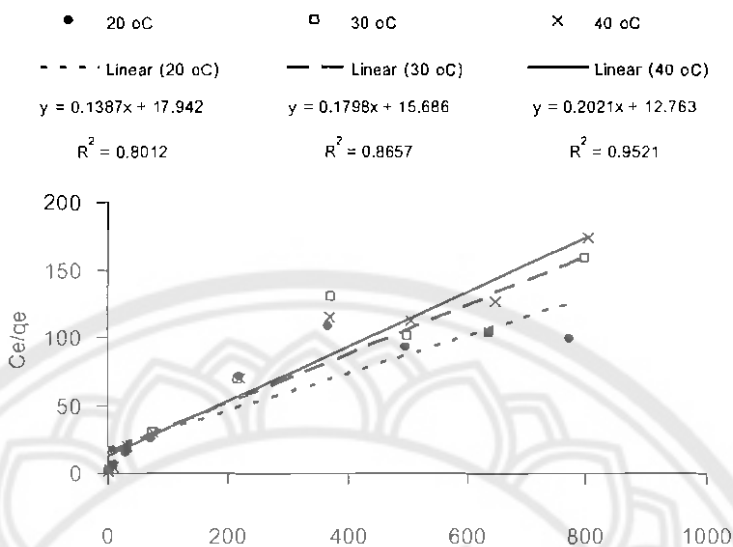


ภาพ 68 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านเมล็ดมะขามดูดซับสีเหลือง

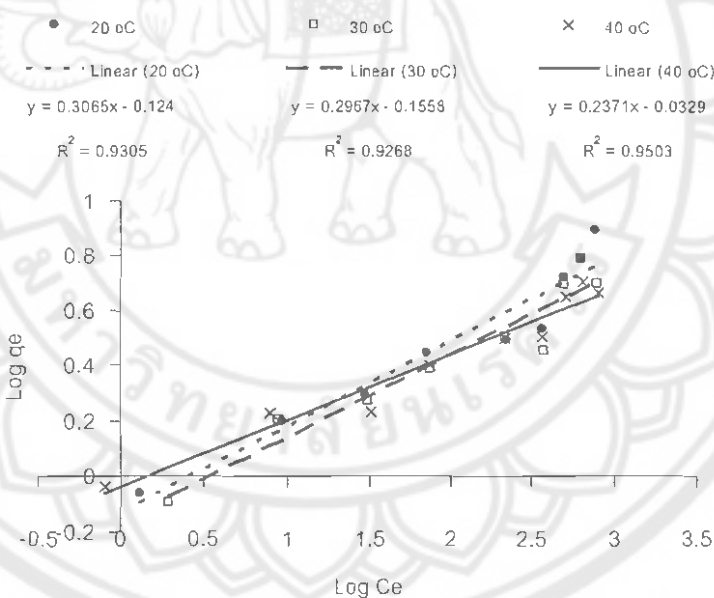


ภาพ 69 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านเมล็ดมะขามดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 68 และ 69 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับด้วยถ่านเมล็ดมะขาม พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 ไม่แตกต่างกัน โดย Langmuir model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9028 0.9474 และ 0.9188 ตามลำดับ ส่วน Freundlich model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9774 0.9602 และ 0.9249 ตามลำดับ

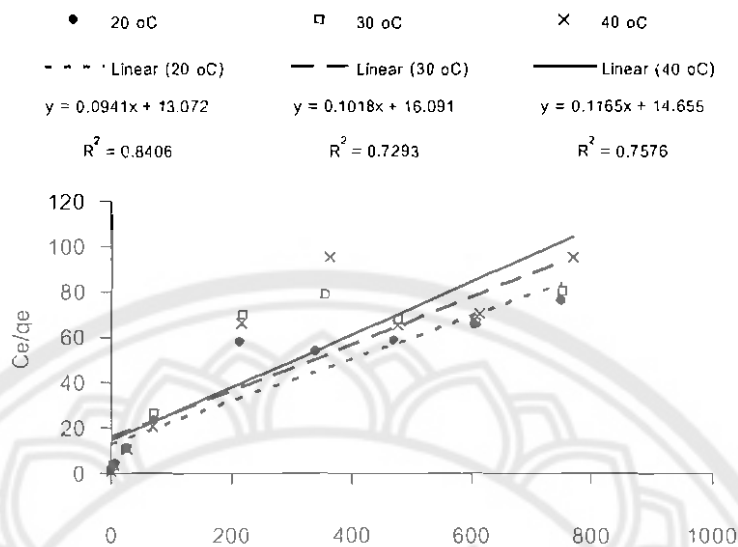


ภาพ 70 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านเมล็ดมะขามดูดซับสีแดง

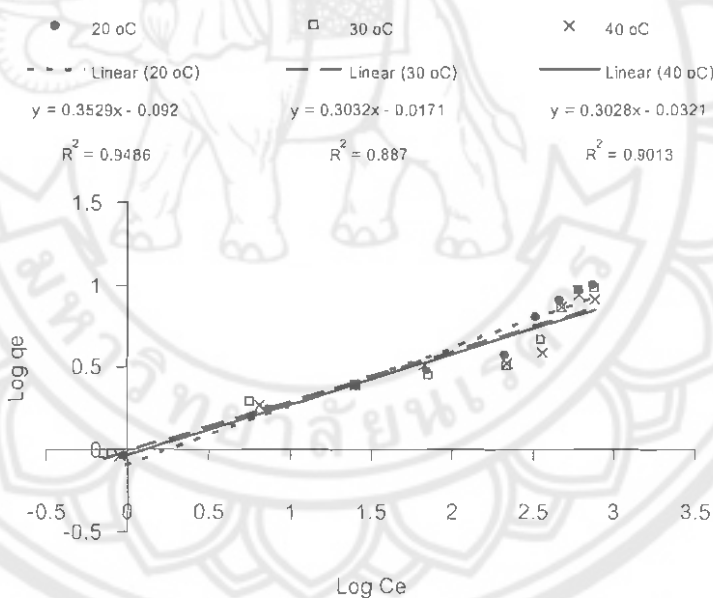


ภาพ 71 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านเมล็ดมะขามดูดซับสีแดง

จากภาพ 70 และ 71 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีแดงด้วยถ่านเมล็ดมะขาม พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9305 0.9268 และ 0.9503 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8012 0.8657 และ 0.9521 ตามลำดับ

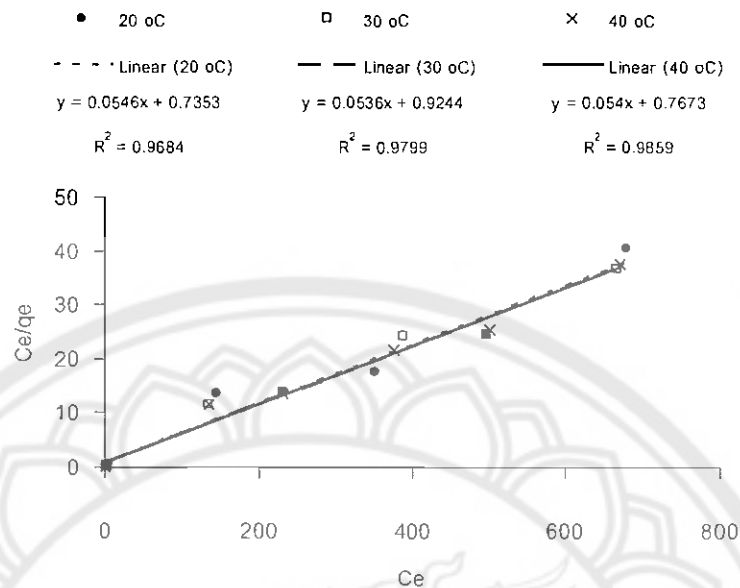


ภาพ 72 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านเมล็ดมะขามดูดซับสีน้ำเงิน

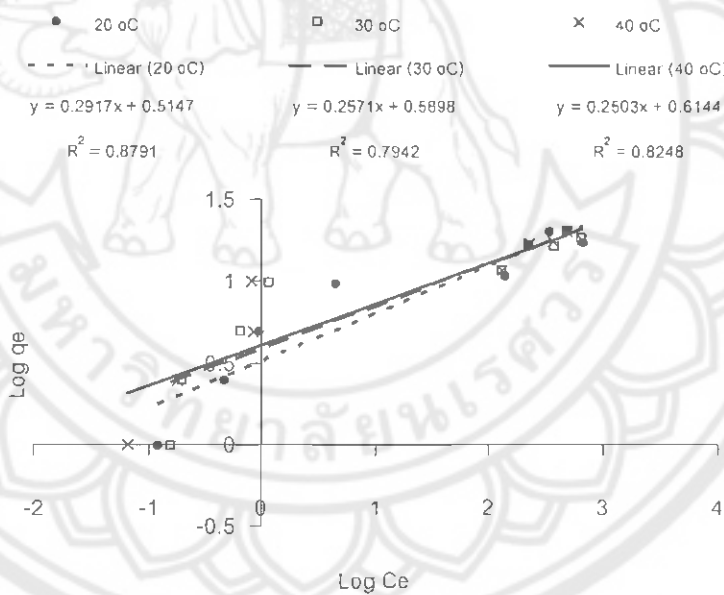


ภาพ 73 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านเมล็ดมะขามดูดซับสีน้ำเงิน

จากภาพ 72 และ 73 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงินด้วยถ่านเมล็ดมะขาม พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9486 0.8870 และ 0.9013 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8406 0.7293 และ 0.7576 ตามลำดับ

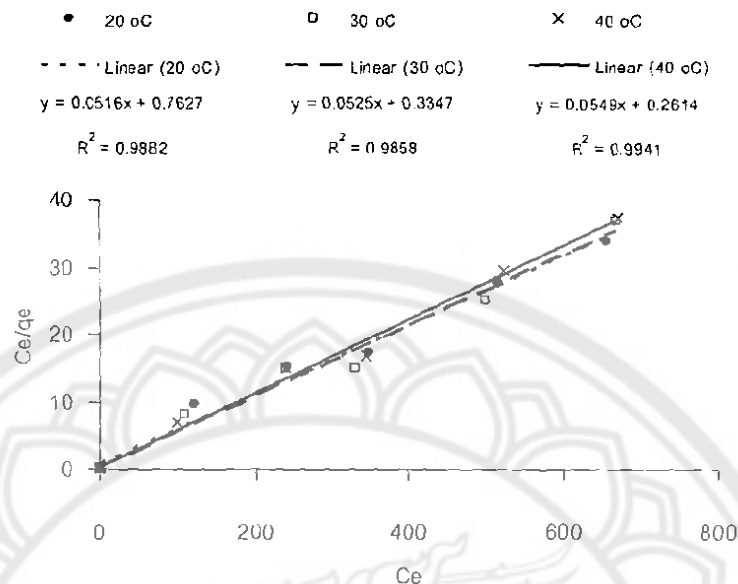


ภาพ 74 ผลการศึกษาค่า Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ดูดซับสีเหลือง

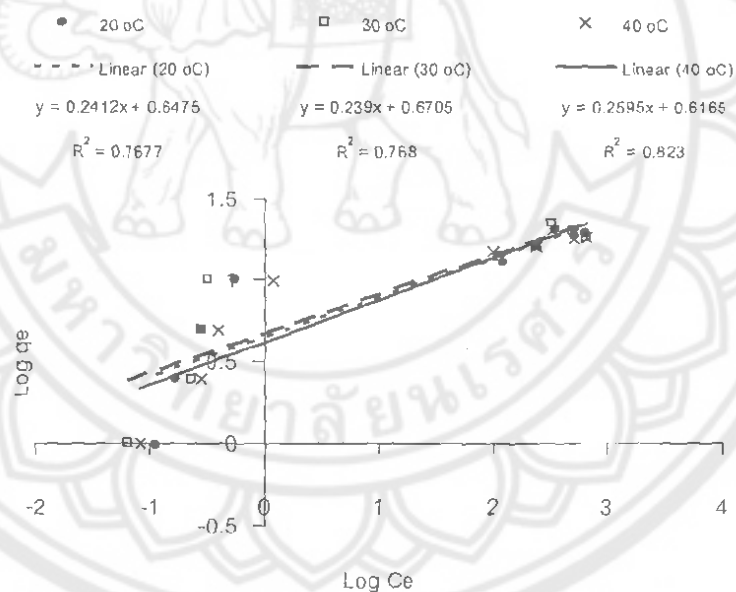


ภาพ 75 ผลการศึกษาค่า Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 74 และ 75 ผลการศึกษาค่า Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีเหลืองด้วยถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9684 0.9799 และ 0.9859 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8791 0.7942 และ 0.8248 ตามลำดับ

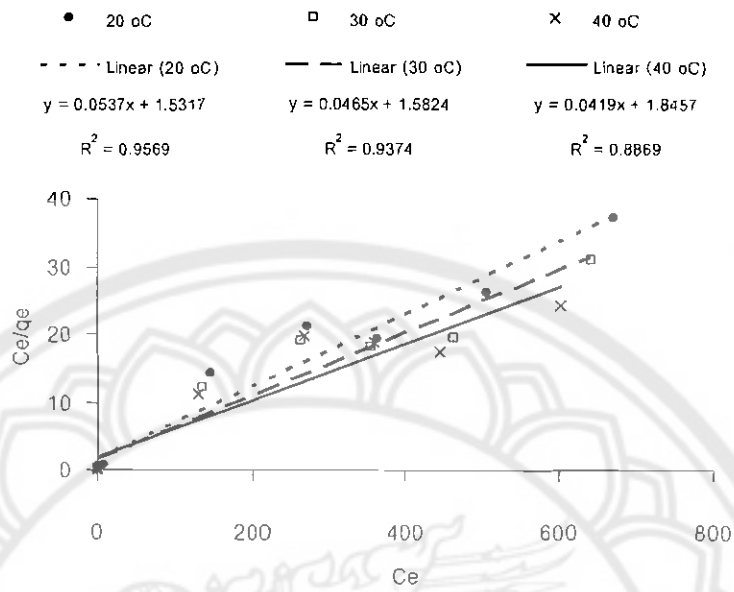


ภาพ 76 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ดูดซับสีแดง

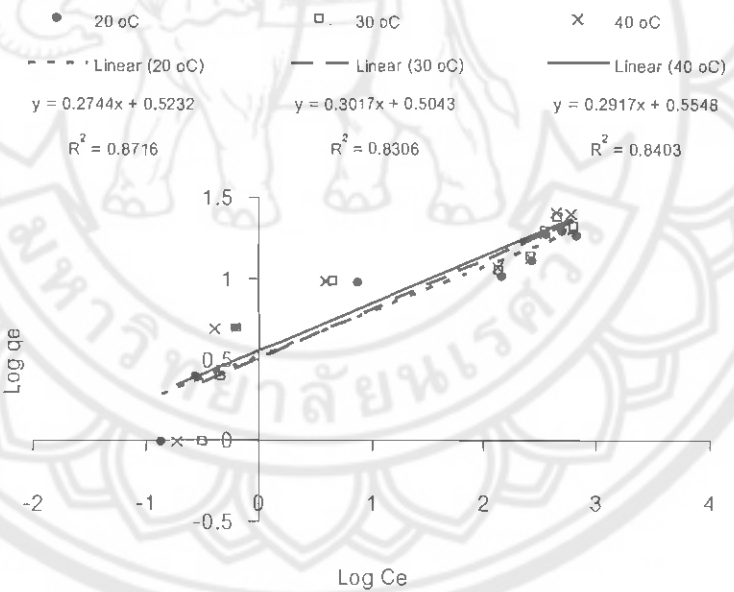


ภาพ 77 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ดูดซับสีแดง

จากภาพ 76 และ 77 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีแดงด้วยถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9882 0.9858 และ 0.9941 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.7677 0.7680 และ 0.8230 ตามลำดับ

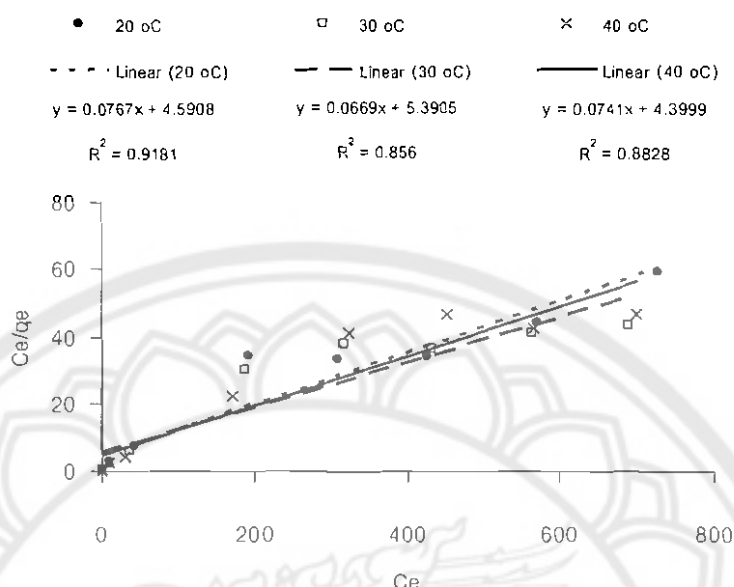


ภาพ 78 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ดูดซับสีน้ำเงิน

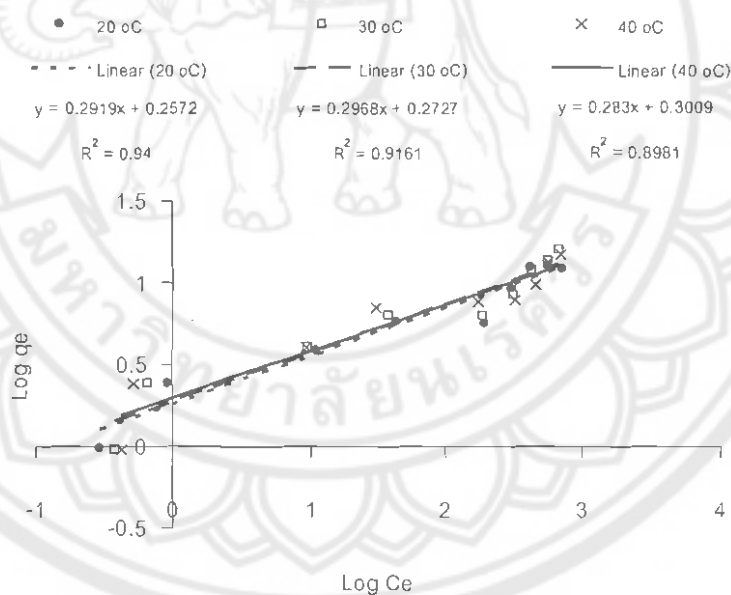


ภาพ 79 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ดูดซับสีน้ำเงิน

จากภาพ 78 และ 79 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงินด้วยถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9569 0.9374 และ 0.8869 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8716 0.8306 และ 0.8403 ตามลำดับ

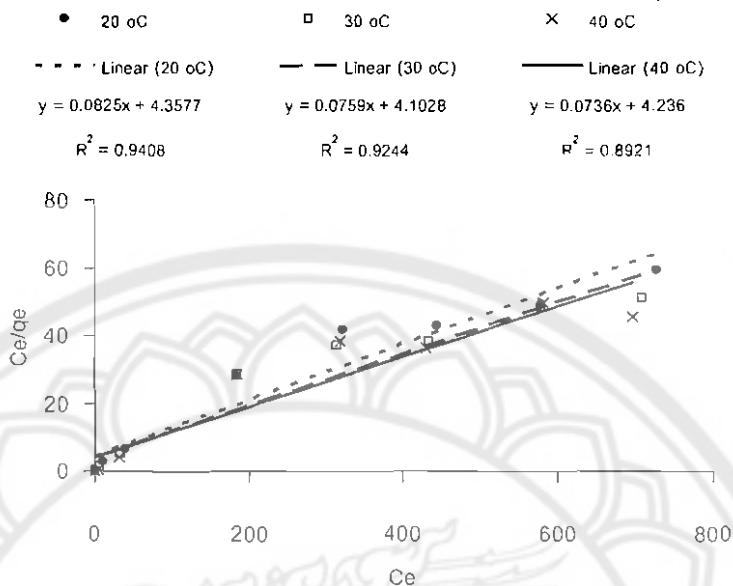


ภาพ 80 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดดูดซับสีเหลือง

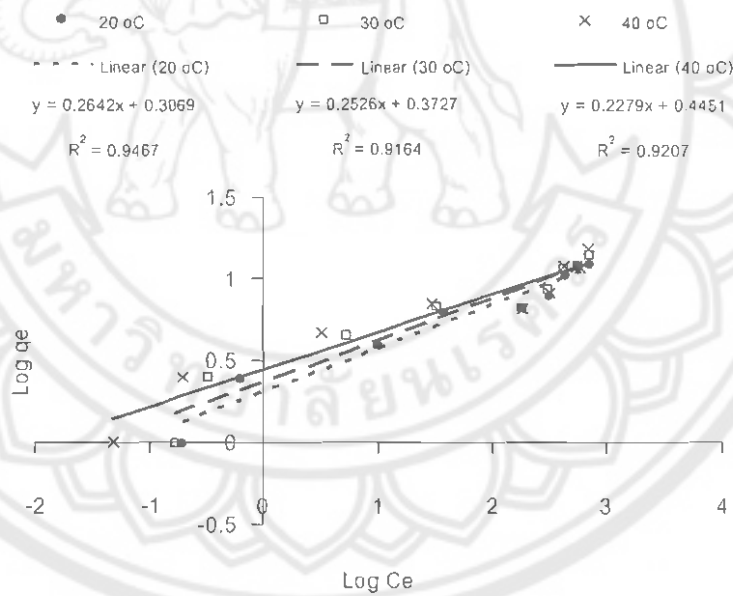


ภาพ 81 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 80 และ 81 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีเหลืองด้วยถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 ไม่แตกต่างกัน โดย Langmuir model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9181 0.8560 และ 0.8828 ตามลำดับ ส่วน Freundlich model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9400 0.9161 และ 0.8981 ตามลำดับ

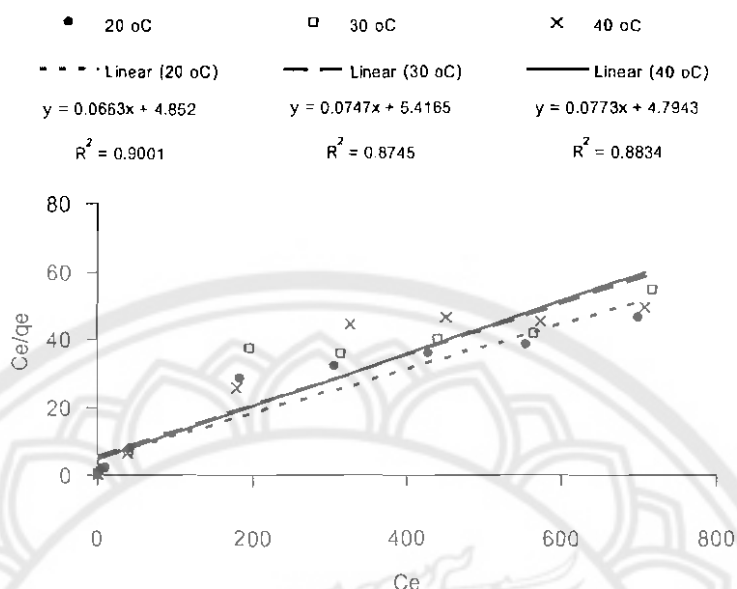


ภาพ 82 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดดูดซับสีแดง

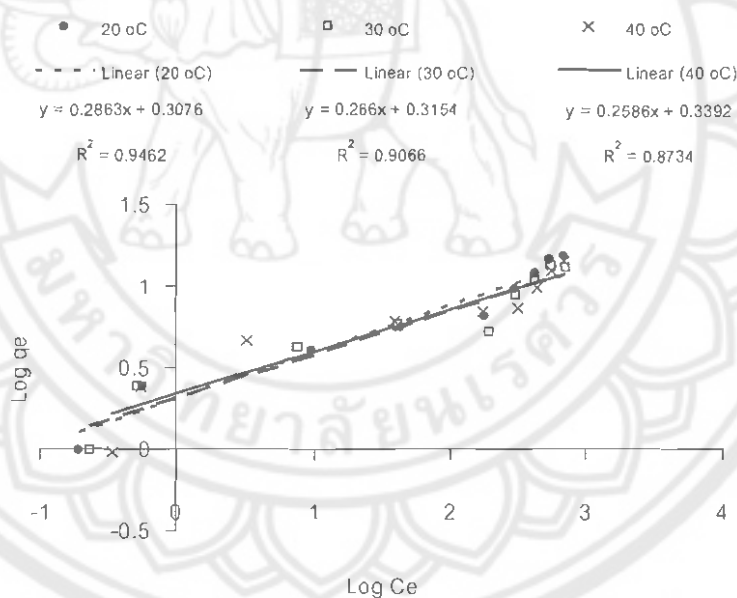


ภาพ 83 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดดูดซับสีแดง

จากภาพ 82 และ 83 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีแดงด้วยถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R² ไม่แตกต่างกัน โดย Langmuir model มีค่า R² เท่ากับ 0.9408 0.9244 และ 0.8921 ตามลำดับ ส่วน Freundlich model มีค่า R² เท่ากับ 0.9467 0.9164 และ 0.9207 ตามลำดับ

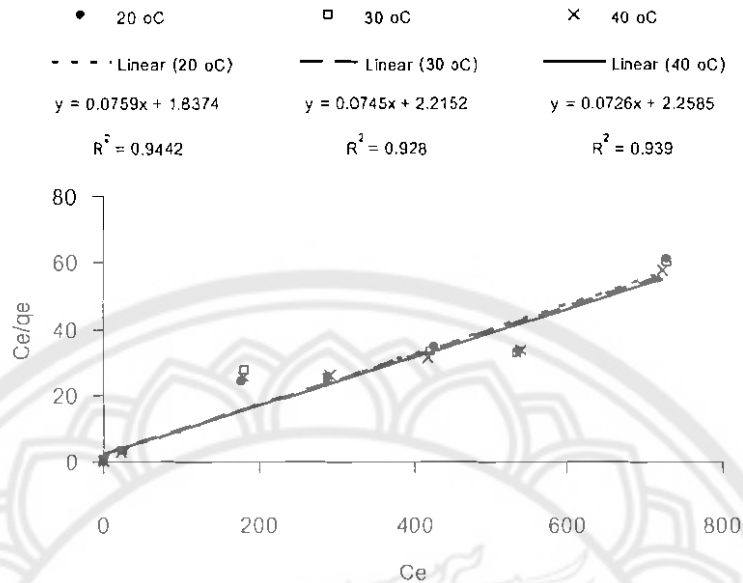


ภาพ 84 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดดูดซับสีน้ำเงิน

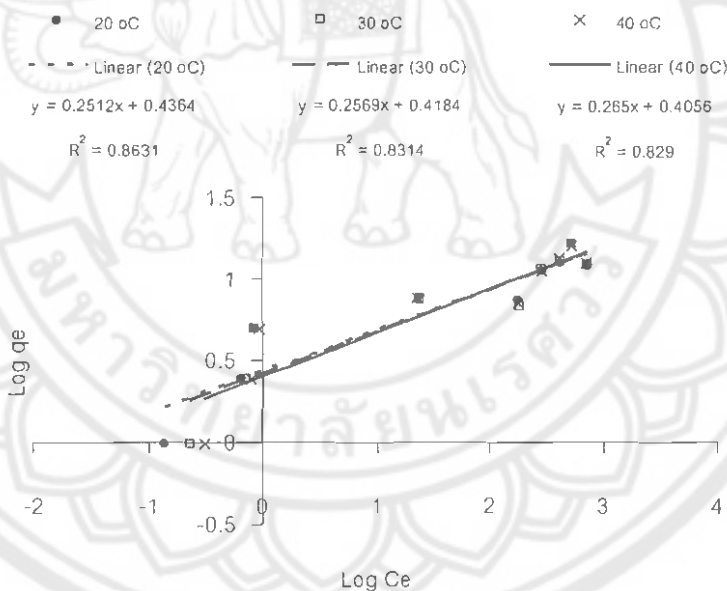


ภาพ 85 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดดูดซับสีน้ำเงิน

จากภาพ 84 และ 85 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงินด้วยถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model เนื่องจากมีค่า R^2 ไม่แตกต่างกัน โดย Langmuir model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9001 0.8745 และ 0.8834 ตามลำดับ ส่วน Freundlich model มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9462 0.9066 และ 0.8734 ตามลำดับ

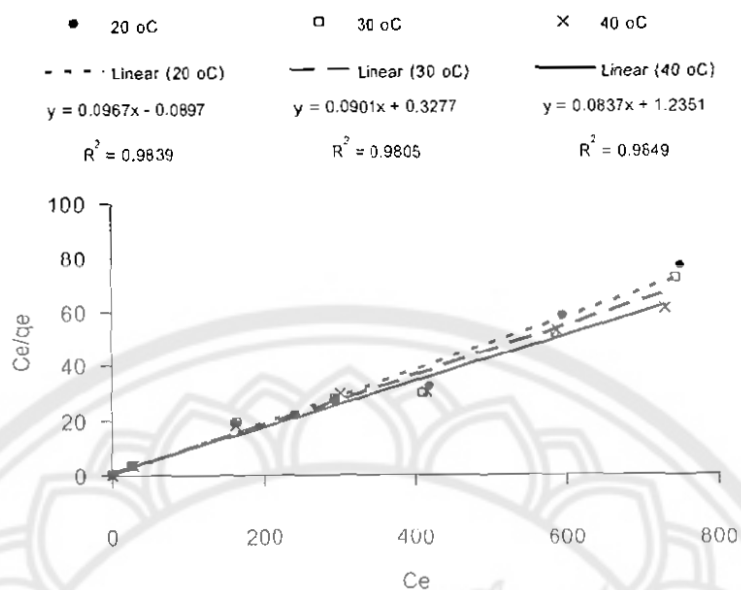


ภาพ 86 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามดูดซับสีเหลือง

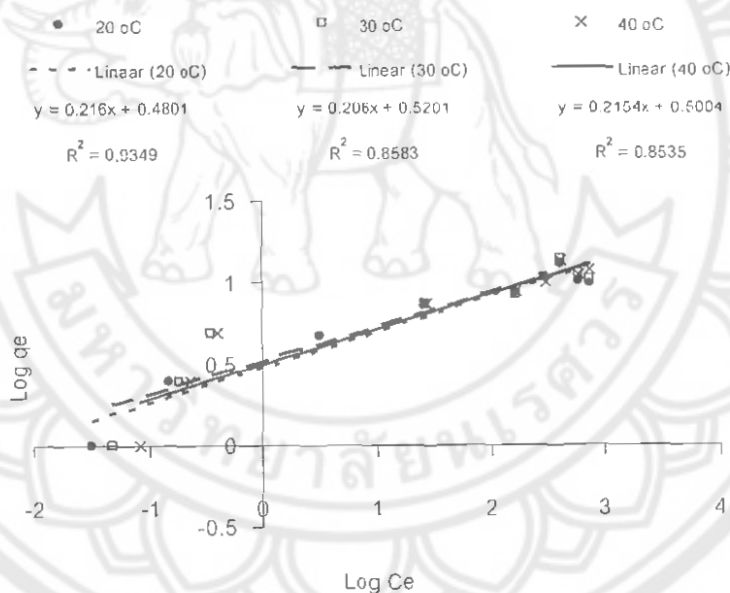


ภาพ 87 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามดูดซับสีเหลือง

จากภาพ 86 และ 87 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีเหลืองด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9442 0.9280 และ 0.9390 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8631 0.8314 และ 0.8290 ตามลำดับ

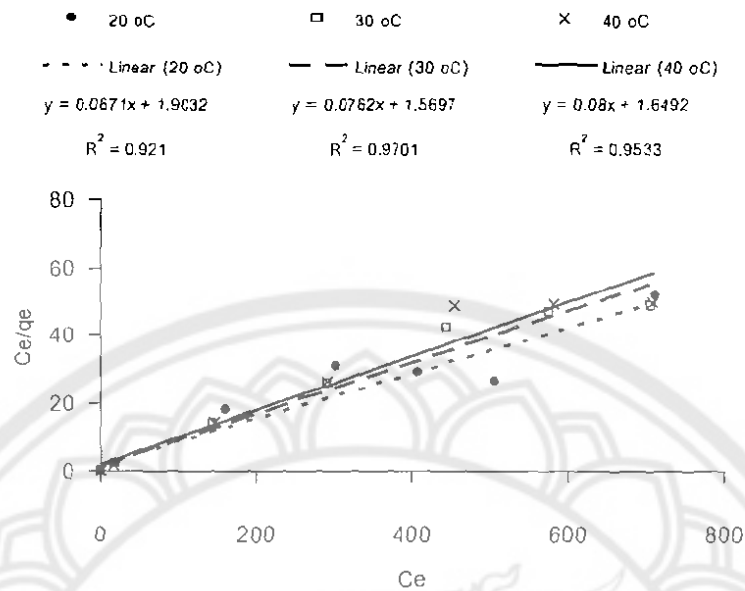


ภาพ 88 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามดูดซับสีแดง

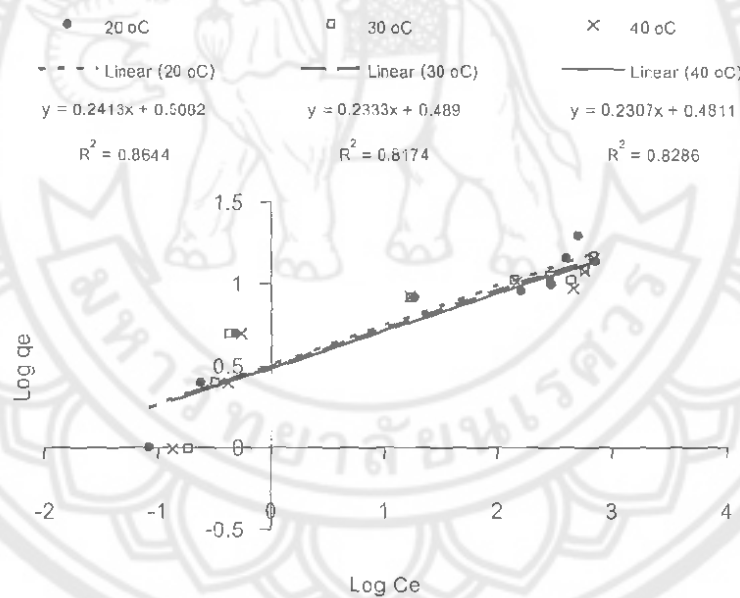


ภาพ 89 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามดูดซับสีแดง

จากภาพ 88 และ 89 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับดูดซับสีแดงด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9839 0.9805 และ 0.9849 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.9349 0.8583 และ 0.8535 ตามลำดับ



ภาพ 90 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามดูดซับสีน้ำเงิน



ภาพ 91 ผลการศึกษา Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามดูดซับสีน้ำเงิน

จากภาพ 90 และ 91 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงินด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C สอดคล้องกับ Langmuir model เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9210 0.9701 และ 0.9533 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 จาก Freundlich model โดยมีค่าเท่ากับ 0.8644 0.8174 และ 0.8286 ตามลำดับ

ในการศึกษาไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมในการดูดซับของสาร โดยไอโซเทอมของ Langmuir นั้นทุก ๆ จุดบนตัวดูดซับมีความสามารถดูดติดได้เท่า ๆ กัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้ชั้นเดียว (monolayer) และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วอิออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน (homogeneous surface) ส่วนไอโซเทอมของ Freundlich การดูดซับทุกจุดไม่เท่ากัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้แบบต่อเนื่อง (สุจิตา โชคธัญญาวัฒน์, 2544 ; Iqbal & Ashiq, 2006) เมื่อนำข้อมูล Adsorption Isotherm การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Yellow 145, Reactive Red 195, Reactive Blue 222) ด้วย ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่านและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม มาคำนวณค่าคงที่ของสมการ Langmuir ซึ่งได้แก่ค่า X_m และค่า K โดยหาได้จากความชันและจุดตัดแกน y ในการพล็อตกราฟระหว่าง C_e และ C_e/q_e สำหรับการคำนวณค่าคงที่ของสมการ Freundlich ซึ่งได้แก่ค่า n และ K_f โดยหาได้จากความชันและจุดตัดแกน y ในการพล็อตกราฟระหว่าง $\log C_e$ และ $\log q_e$ สำหรับค่าคงที่ X_m บอถึงปริมาณที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียวที่อิ่มตัว (mg/g) ส่วนค่า K คือสัมประสิทธิ์ของการดูดซับ (ml/mg) จะแสดงถึงพลังงานยึดเหนี่ยวสัมพันธ์ (Relative binding energies) และความแข็งแรงในการดูดซับ ถ้าค่า K สูงแสดงถึงพลังงานในการยึดเหนี่ยวและความแข็งแรงในการดูดซับสูง (Sakkayawong et al., 2005 ; Iqbal & Ashiq, 2006) สำหรับค่า n ถ้ามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นช้ากว่าการเพิ่มของความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล (Iqbal & Ashiq, 2006) ส่วนค่า K_f คือค่าคงที่ของการดูดซับซึ่งจะชี้แสดงถึงความจุในการดูดซับ (mg/g) ถ้าค่า K_f สูงแสดงว่าตัวดูดซับมีความจุในการดูดซับสูงด้วย (Rattanaphani et al., 2007 ; Iqbal & Ashiq, 2006) จากการคำนวณค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ได้ผลดังตาราง 7-12

ตาราง 7 ค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm ในการดูดซับสีเหลือง (Reactive Yellow 145)

| ตัวดูดซับ | Langmuir Isotherm | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | X_m (mg/g) | | | K (ml/mg) | | | R^2 | | |
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 63.694 | 67.114 | 85.470 | 256.117 | 178.017 | 165.488 | 0.9840 | 0.9862 | 0.9644 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 13.477 | 14.164 | 14.124 | 11.237 | 11.443 | 11.369 | 0.8286 | 0.8404 | 0.8152 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | 9.662 | 8.130 | 8.347 | 6.893 | 9.556 | 9.854 | 0.9644 | 0.9774 | 0.9747 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | 8.628 | 6.596 | 6.789 | 9.132 | 14.564 | 18.766 | 0.9028 | 0.9474 | 0.9188 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 18.315 | 18.657 | 18.519 | 74.255 | 57.984 | 70.377 | 0.9684 | 0.9799 | 0.9859 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 13.038 | 14.948 | 13.495 | 16.707 | 12.411 | 16.841 | 0.9181 | 0.8560 | 0.8828 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 13.175 | 13.423 | 13.774 | 41.308 | 33.631 | 32.145 | 0.9442 | 0.9280 | 0.9390 |

ตาราง 8 ค่าคงที่ของ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีเหลือง (Reactive Yellow 145)

| ตัวดูดซับ | Freundlich Isotherm | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | n | | | K_f | | | R^2 | | |
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 2.262 | 2.220 | 1.532 | 9.775 | 9.714 | 10.058 | 0.8491 | 0.6557 | 0.8131 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 3.623 | 3.372 | 3.808 | 1.852 | 1.726 | 2.050 | 0.9187 | 0.946 | 0.9419 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | 1.914 | 2.086 | 2.207 | 0.283 | 0.341 | 0.407 | 0.9917 | 0.9834 | 0.9795 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | 2.877 | 3.621 | 3.682 | 0.739 | 0.962 | 1.102 | 0.9774 | 0.9602 | 0.9249 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 3.428 | 3.890 | 3.995 | 3.271 | 3.889 | 4.115 | 0.8791 | 0.7942 | 0.8248 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 3.426 | 3.369 | 3.534 | 1.808 | 1.874 | 1.999 | 0.9400 | 0.9161 | 0.8981 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 3.981 | 3.893 | 3.774 | 2.731 | 2.621 | 2.544 | 0.8631 | 0.8314 | 0.8290 |

จากตาราง 7 และ 8 แสดงค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสีเหลือง (Reactive Yellow 145) ด้วยถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่าน และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม ที่อุณหภูมิ 20 °C, 30 °C และ 40 °C จากการศึกษาสมการ Langmuir และ Freundlich ด้วยการพล็อตกราฟในสมการเชิงเส้นตรง จะได้ค่า R^2 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม สอดคล้องกับ Langmuir model แสดงว่าทุก ๆ จุดบนตัวดูดซับมีความสามารถดูดติดได้เท่า ๆ กัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้ชั้นเดียว (monolayer) และเมื่อเกิด

การดูดซับแล้ว อีออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน (homogeneous surface) ส่วนถ่านไมยราบยักษ์ สอดคล้องกับ Freundlich model แสดงว่าการดูดซับทุก ๆ จุดไม่เท่ากัน การดูดซับเป็นแบบ ต่อเนื่อง แต่สำหรับ ถ่านเปลือกมังคุด, ถ่านเมล็ดมะขาม และ ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model แสดงว่าการดูดซับมีโอกาสที่จะเป็นได้ทั้งแบบขั้นเดียวและแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาใน Langmuir model พบว่าค่า K และ ค่า X_m ทั้ง 3 อุณหภูมิ ของตัวดูดซับทุกชนิดมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน คือเมื่อค่า K สูง ค่า X_m ก็สูงเช่นกัน แสดงว่าตัวดูดซับที่มีพลังงานในการยึดเหนี่ยวและความแข็งแรงในการดูดซับสูงจะทำให้ปริมาณที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียวที่อิ่มตัวสูงขึ้นด้วย โดย ถ่านกัมมันต์มาตรฐานมีค่า K และ X_m สูงสุด รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ส่วนการพิจารณาใน Freundlich model นั้น พบว่าค่า n ทั้ง 3 อุณหภูมิของตัวดูดซับทุกชนิดมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นช้ากว่าการเพิ่มของความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล ส่วนค่า K_f ซึ่งแสดงถึงความจุในการดูดซับสูงสุด พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ดังนั้นจากการศึกษาไอโซเทอมทั้ง Langmuir และ Freundlich พบว่าค่า K , X_m , K_f และค่า n มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน โดย ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ

ตาราง 9 ค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm ในการดูดซับสีแดง (Reactive Red 195)

| ตัวดูดซับ | Langmuir Isotherm | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------|---------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | X_m (mg/g) | | | K (ml/mg) | | | R^2 | | |
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 222.22 | -200.0 | -3333.3 | 87.549 | -50.556 | -8.523 | 0.2699 | 0.0364 | 0.0013 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 12.376 | 11.682 | 8.865 | 4.787 | 5.519 | 8.205 | 0.5113 | 0.5873 | 0.7860 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | 7.800 | 9.166 | 12.210 | 3.513 | 2.624 | 2.604 | 0.3706 | 0.3399 | 0.3884 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | 7.210 | 5.562 | 4.948 | 7.730 | 11.462 | 15.835 | 0.8012 | 0.8657 | 0.9521 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 19.380 | 19.048 | 18.215 | 67.654 | 156.857 | 210.023 | 0.9882 | 0.9858 | 0.9941 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 12.121 | 13.175 | 13.587 | 18.932 | 18.500 | 17.375 | 0.9408 | 0.9244 | 0.8921 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 10.341 | 11.099 | 11.947 | -1078.04 | 67.862 | 67.768 | 0.9839 | 0.9805 | 0.9849 |

ตาราง 10 ค่าคงที่ของ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีแดง (Reactive Red 195)

| ตัวดูดซับ | Freundlich Isotherm | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | n | | | K_f | | | R^2 | | |
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 0.962 | 0.869 | 0.943 | 17.989 | 13.896 | 31.456 | 0.9335 | 0.8312 | 0.9556 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 2.999 | 2.966 | 3.524 | 0.923 | 0.902 | 1.058 | 0.8438 | 0.869 | 0.8971 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | 2.344 | 2.323 | 2.116 | 0.315 | 0.303 | 0.309 | 0.7991 | 0.8035 | 0.8689 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | 3.263 | 3.370 | 4.218 | 0.752 | 0.699 | 0.927 | 0.9305 | 0.9268 | 0.9503 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 4.146 | 4.184 | 3.854 | 4.441 | 4.683 | 4.135 | 0.7677 | 0.7680 | 0.8230 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 3.785 | 3.959 | 4.388 | 2.027 | 2.359 | 2.787 | 0.9467 | 0.9164 | 0.9207 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 4.630 | 4.854 | 4.643 | 3.021 | 3.312 | 3.165 | 0.9349 | 0.8583 | 0.8535 |

จากตาราง 9 และ 10 แสดงค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสีแดง (Reactive Red 195) ด้วย ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่าน และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม ที่อุณหภูมิ 20 °C, 30 °C และ 40 °C จากการศึกษาสมการ Langmuir และ Freundlich ด้วยการพล็อตกราฟในสมการเชิงเส้นตรงจะได้ค่า R^2 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม สอดคล้องกับ Langmuir model แสดงว่าทุก ๆ จุดบนตัวดูดซับมีความสามารถดูดติดได้เท่า ๆ กัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้ชั้นเดียว (monolayer) และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วอิ่มหรือไม่เลกุล

จะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน (homogeneous surface) ส่วน ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเปลือกมังคุด และถ่านเมล็ดมะขามสอดคล้องกับ Freundlich model แสดงว่าการดูดซับทุก ๆ จุดไม่เท่ากัน การดูดซับเป็นแบบต่อเนื่อง แต่สำหรับถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model แสดงว่าการดูดซับมีโอกาสที่จะเป็นได้ทั้งแบบขั้นเดียวและแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาใน Langmuir model พบว่าค่า K และค่า X_m ของ ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 30 °C และ 40 °C และของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ที่อุณหภูมิ 20 °C ไม่มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณา ซึ่งพบว่าค่า K และ ค่า X_m ทั้ง 3 อุณหภูมิ ของตัวดูดซับทุกชนิด ยกเว้น ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน (พิจารณาที่ 20 °C) และ ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม (พิจารณาที่ 30 °C และ 40 °C) มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน คือเมื่อค่า K สูง ค่า X_m ก็สูงเช่นกัน แสดงว่าตัวดูดซับที่มีพลังงานในการยึดเหนี่ยวและความแข็งแรงในการดูดซับสูงจะทำให้ปริมาณที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียวที่อัดตัวสูงขึ้นด้วย โดย ถ่านกัมมันต์มาตรฐานมีค่า K และ X_m สูงสุด รองลงมาเป็น ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ส่วนการพิจารณาใน Freundlich model นั้น พบว่าค่า n ทั้ง 3 อุณหภูมิของ ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเพิ่มของความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล แต่สำหรับตัวดูดซับชนิดอื่น มีค่า n สูงกว่า 1 มาก แสดงว่าปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นช้ากว่าการเพิ่มของความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล ส่วนค่า K_f ซึ่งแสดงถึงความจุในการดูดซับสูงสุด พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ดังนั้นจากการศึกษาไอโซเทอมทั้ง Langmuir และ Freundlich พบว่าค่า K , X_m , K_f และค่า n มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน โดย ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน มีค่าสูงสุด รองลงมา เป็นถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านเปลือกมังคุด ตามลำดับ

ตาราง 11 ค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงิน (Reactive Blue 222)

| ตัวดูดซับ | Langmuir Isotherm | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | X_m (mg/g) | | | K (ml/mg) | | | R^2 | | |
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 40.323 | 40.323 | 49.50 | 69.448 | 109.299 | 61.548 | 0.9896 | 0.9986 | 0.9858 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 9.690 | 9.625 | 8.217 | 8.725 | 9.712 | 12.183 | 0.7807 | 0.7984 | 0.8457 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | 6.135 | 5.565 | 4.794 | 4.074 | 5.459 | 7.855 | 0.5052 | 0.7307 | 0.7639 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | 10.627 | 9.823 | 8.584 | 7.199 | 6.327 | 7.950 | 0.8406 | 0.7293 | 0.7576 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 18.622 | 21.505 | 23.866 | 35.059 | 29.386 | 22.701 | 0.9569 | 0.9374 | 0.8869 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 15.083 | 13.387 | 12.937 | 13.664 | 13.791 | 16.123 | 0.9001 | 0.8745 | 0.8834 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 14.903 | 13.123 | 12.500 | 35.26 | 48.544 | 48.508 | 0.9210 | 0.9701 | 0.9533 |

ตาราง 12 ค่าคงที่ของ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีน้ำเงิน (Reactive Blue 222)

| ตัวดูดซับ | Freundlich Isotherm | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | n | | | K_f | | | R^2 | | |
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | 2.684 | 2.400 | 2.220 | 5.054 | 4.480 | 4.445 | 0.9366 | 0.8949 | 0.9214 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | 4.112 | 4.200 | 4.589 | 1.508 | 1.599 | 1.638 | 0.8535 | 0.8366 | 0.8590 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | 3.475 | 3.014 | 4.034 | 0.567 | 0.438 | 0.725 | 0.6901 | 0.8314 | 0.8376 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | 2.834 | 3.298 | 3.303 | 0.809 | 0.961 | 0.929 | 0.9486 | 0.8870 | 0.9013 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | 3.644 | 3.315 | 3.428 | 3.336 | 3.194 | 3.588 | 0.8716 | 0.8306 | 0.8403 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | 3.493 | 3.759 | 3.867 | 2.030 | 2.067 | 2.184 | 0.9462 | 0.9066 | 0.8734 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | 4.144 | 4.286 | 4.335 | 3.223 | 3.083 | 3.028 | 0.8644 | 0.8174 | 0.8286 |

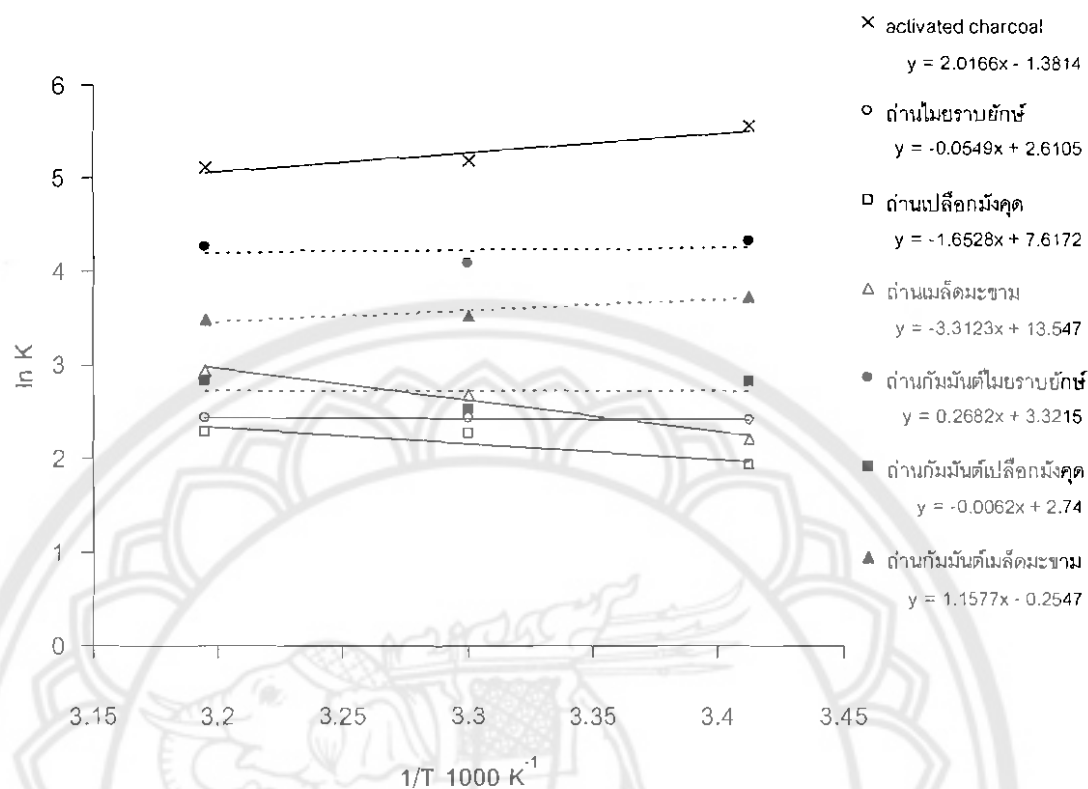
จากตาราง 11 และ 12 แสดงค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสีน้ำเงิน (Reactive Blue 222) ด้วย ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่าน และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม ที่อุณหภูมิ 20 °C, 30 °C และ 40 °C จากการศึกษาสมการ Langmuir และ Freundlich ด้วยการพล็อตกราฟในสมการเชิงเส้นตรงจะได้ค่า R^2 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามสอดคล้องกับ Langmuir model แสดงว่าทุก ๆ จุดบนตัวดูดซับมีความสามารถดูดติดได้เท่า ๆ กัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้ชั้นเดียว (monolayer) และเมื่อเกิด

การดูดซับแล้วอินหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน (homogeneous surface) ส่วนด้านไมยราบยักษ์, ด้านเปลือกมังคุด และด้านเมล็ดมะขามสอดคล้องกับ Freundlich model แสดงว่าการดูดซับทุก ๆ จุดไม่เท่ากัน การดูดซับเป็นแบบต่อเนื่อง แต่สำหรับด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด สอดคล้องทั้ง Langmuir model และ Freundlich model แสดงว่าการดูดซับมีโอกาสที่จะเป็นได้ทั้งแบบขั้นเดียวและแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาใน Langmuir model พบว่าค่า K และ ค่า X_m ทั้ง 3 อุณหภูมิ ของด้านกัมมันต์มาตรฐาน, ด้านไมยราบยักษ์, ด้านเปลือกมังคุดและด้านเมล็ดมะขาม มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน คือ เมื่อค่า K สูง ค่า X_m ก็สูงเช่นกัน แสดงว่าตัวดูดซับที่มีพลังงานในการยึดเหนี่ยวและความแข็งแรงในการดูดซับสูงจะทำให้ปริมาณที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียวที่อิ่มตัวสูงขึ้นด้วย โดย ด้านกัมมันต์มาตรฐานมีค่า K และ X_m สูงสุด รองลงมาเป็น ด้านไมยราบยักษ์, ด้านเมล็ดมะขาม และด้านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ส่วนด้านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขามนั้น ไม่มีความสอดคล้องกัน โดยค่า K ของด้านกัมมันต์เมล็ดมะขามสูงกว่าของด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ และด้านกัมมันต์เมล็ดมะขามตามลำดับ ซึ่งหมายถึงการที่มีพลังงานในการยึดเหนี่ยวและความแข็งแรงในการดูดซับที่สูงกว่า แต่สำหรับค่า X_m ของด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นด้านกัมมันต์เปลือกมังคุดและด้านกัมมันต์เมล็ดมะขามตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์มีปริมาณที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียวที่อิ่มตัวสูงกว่า ส่วนการพิจารณาใน Freundlich model นั้น พบว่าค่า n ทั้ง 3 อุณหภูมิของตัวดูดซับทุกชนิดมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณสี่เหลี่ยมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นช้ากว่าการเพิ่มของความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล ส่วนค่า K , ซึ่งแสดงถึงความจุในการดูดซับสูงสุด พบว่า ด้านกัมมันต์มาตรฐาน มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ด้านไมยราบยักษ์, ด้านเมล็ดมะขาม และด้านเปลือกมังคุด ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าคงที่ของสมการ Langmuir หรือ Freundlich ในการดูดซับสี่เหลี่ยมทั้ง 3 โทนสี (เหลือง, แดง, น้ำเงิน) ที่อุณหภูมิ 20 °C, 30 °C และ 40 °C ด้วยตัวดูดซับทุกชนิดพบว่า ด้านกัมมันต์มาตรฐานมีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุด รองลงมาเป็น ด้านกัมมันต์ไมยราบยักษ์, ด้านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, ด้านกัมมันต์เปลือกมังคุด, ด้านไมยราบยักษ์, ด้านเมล็ดมะขาม และด้านเปลือกมังคุด ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับนั้น พบมีความแตกต่างกันไปตามโทนสีและประเภทของตัวดูดซับ ดังนั้นจากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับทำให้สามารถสรุปได้ว่าถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH แล้ว จะทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้สูงขึ้น

4.6 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ในการดูดซับสีเขียว

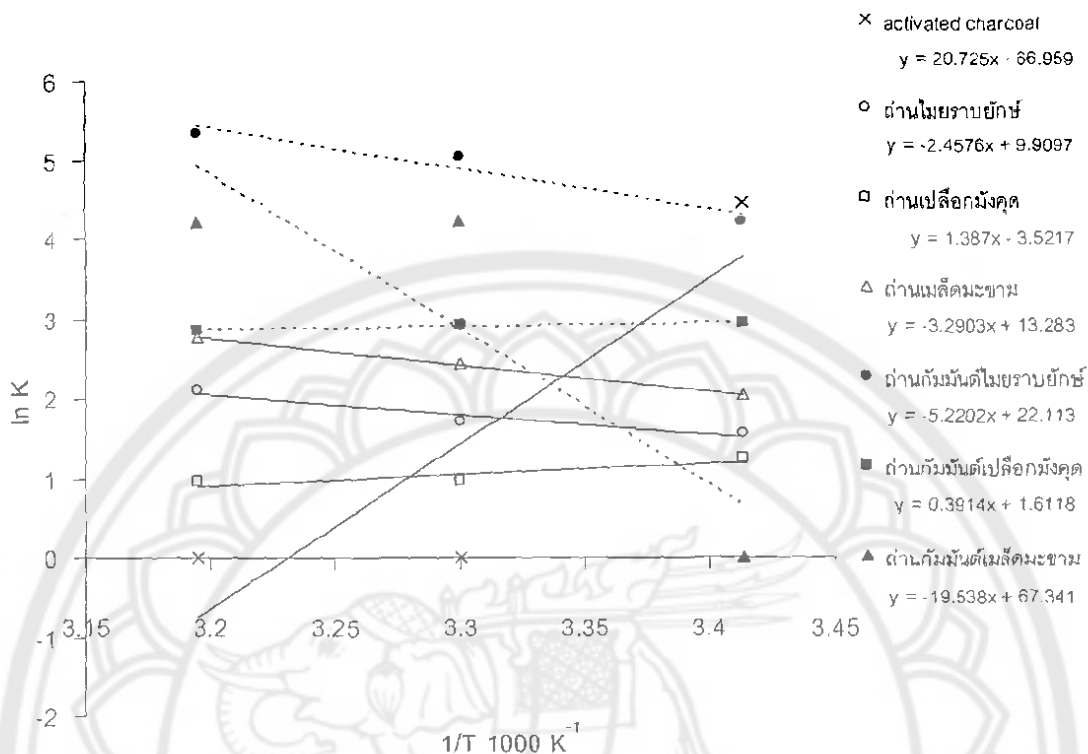
ในการศึกษาค่าเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ จะเป็นการการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงาน เนื่องจากในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมักมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยเสมอ โดยเฉพาะพลังงานความร้อน (Heat, Q) ดังนั้นการศึกษาศมการเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) ของการดูดซับ จึงศึกษาเพื่อหาค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ ได้แก่ พลังงานอิสระ (Gibb's free energy) ; ΔG° ถ้าพลังงานอิสระมีค่าเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ (Tahir & Rauf, 2006 ; Iqbal & Ashiq, 2006) ตามหลักของเทอร์โมไดนามิก พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาที่ความดันคงที่จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (enthalpy ; ΔH°) ของปฏิกิริยา หรือเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแล้วให้ความร้อนออกมาเรียกว่า ปฏิกิริยาคายความร้อน ($-\Delta H^\circ$) ส่วนปฏิกิริยาที่มีการดูดความร้อนเข้าไปในขณะที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาดูดความร้อน ($+\Delta H^\circ$) และนอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy ; ΔS°) ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งค่า ΔH° และ ΔS° นี้สามารถหาได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ของกราฟซึ่งพล็อตระหว่าง $\ln(K)$ กับ $1/T$ (Tahir & Rauf, 2006 ; Iqbal & Ashiq, 2006 ; Rattanaphani et al., 2007) จากการคำนวณค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีเขียวมีแอกทีฟ ซึ่งได้แก่ค่า ΔG° , ΔH° และ ΔS° ได้ผลดังตาราง 13-15



ภาพ 92 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ และ $\ln K$ ในการดูดซับสีเหลือง

ตาราง 13 ค่า ΔG° , ค่า ΔH° และค่า ΔS° ในการดูดซับสีเหลือง

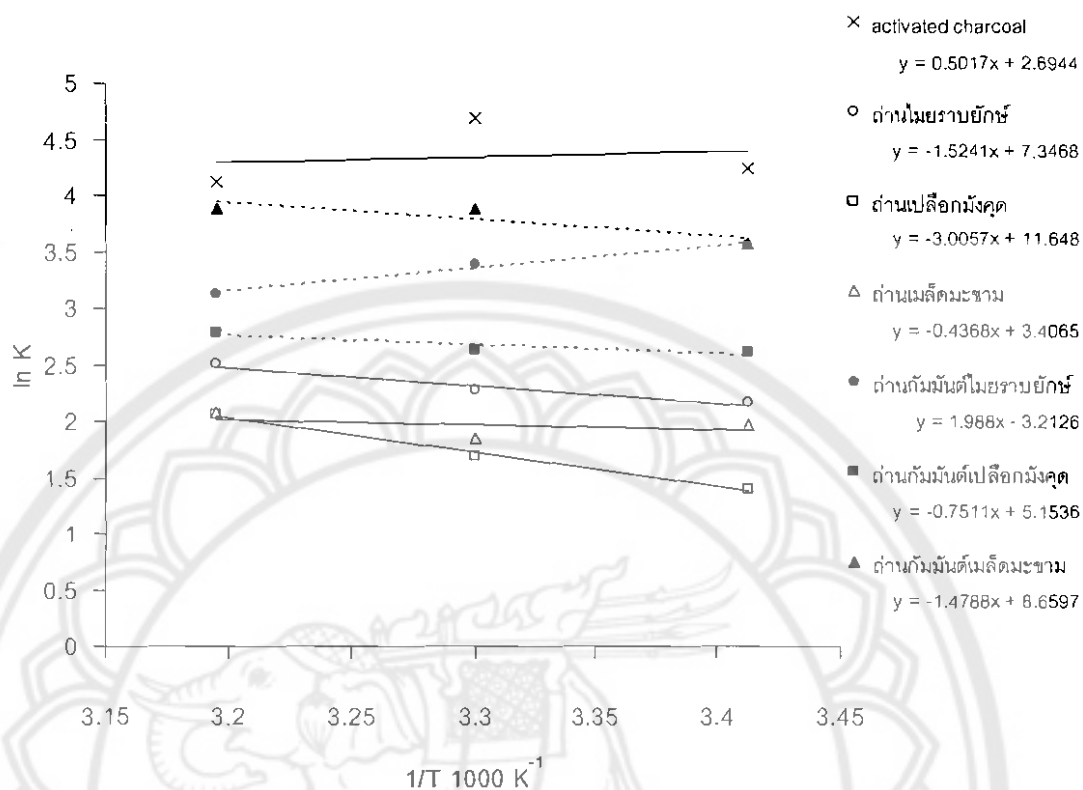
| ตัวดูดซับ | ΔG° (kJ mol ⁻¹) | | | ΔH° (JK ⁻¹ mol ⁻¹) | ΔS° (JK ⁻¹ mol ⁻¹) |
|--------------------------|--|---------|---------|---|---|
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | | |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | -13.509 | -13.054 | -13.295 | -16.766 | -11.485 |
| ถ่านไม้ยราบยักษ์ | -5.893 | -6.140 | -6.326 | 0.456 | 21.704 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | -4.703 | -5.686 | -5.954 | 13.741 | 63.329 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | -5.388 | -6.748 | -7.630 | 27.538 | 112.630 |
| ถ่านกัมมันต์ไม้ยราบยักษ์ | -10.493 | -10.228 | -11.070 | -2.230 | 27.615 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | -6.859 | -6.345 | -7.348 | 0.052 | 22.780 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | -9.065 | -8.856 | -9.031 | -9.625 | -2.118 |



ภาพ 93 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง 1/T และ ln K ในการดูดซับสีแดง

ตาราง 14 ค่า ΔG° , ค่า ΔH° และค่า ΔS° ในการดูดซับสีแดง

| ตัวดูดซับ | ΔG° (kJ mol ⁻¹) | | | ΔH° (JK ⁻¹ mol ⁻¹) | ΔS° (JK ⁻¹ mol ⁻¹) |
|--------------------------|--|---------|---------|---|---|
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | | |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | -10.894 | - | - | -172.308 | -556.697 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | -3.814 | -4.303 | -5.477 | 20.432 | 82.389 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | -3.061 | -2.430 | -2.490 | -11.532 | -29.279 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | -4.982 | -6.144 | -7.188 | 27.356 | 110.435 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | -10.266 | -12.735 | -13.915 | 43.401 | 183.847 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | -7.164 | -7.350 | -7.430 | -3.254 | 13.401 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | - | -10.624 | -10.971 | 162.439 | 559.873 |



ภาพ 94 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ และ $\ln K$ ในการดูดซับสีน้ำเงิน

ตาราง 15 ค่า ΔG° , ค่า ΔH° และค่า ΔS° ในการดูดซับสีน้ำเงิน

| ตัวดูดซับ | ΔG° (kJ mol ⁻¹) | | | ΔH° (JK ⁻¹ mol ⁻¹) | ΔS° (JK ⁻¹ mol ⁻¹) |
|--------------------------|--|---------|---------|---|---|
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | | |
| ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน | -10.330 | -11.825 | -10.721 | -4.171 | 22.401 |
| ถ่านไมยราบยักษ์ | -5.277 | -5.727 | -6.506 | 12.671 | 61.081 |
| ถ่านเปลือกมังคุด | -3.422 | -4.276 | -5.364 | 24.989 | 96.841 |
| ถ่านเมล็ดมะขาม | -4.808 | -4.647 | -5.395 | 3.632 | 28.322 |
| ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ | -8.665 | -8.516 | -8.125 | -16.528 | -26.710 |
| ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด | -6.370 | -6.610 | -7.235 | 6.245 | 42.847 |
| ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม | -8.679 | -9.781 | -10.101 | 12.295 | 71.997 |

จากตาราง 13 แสดงค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งได้แก่ค่า พลังงานอิสระ (ΔG°), ค่าความร้อนหรือ enthalpy (ΔH°) และค่า entropy (ΔS°) ในการดูดซับสีเหลือง พบว่าค่า ΔG° ทั้ง 3 อุณหภูมิของตัวดูดซับทุกชนิด มีค่า ΔG° เป็นลบทั้งหมด แสดงว่าการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ และเมื่อพิจารณาค่า ΔH° พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีค่า ΔH° เป็นลบ แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน คือจะเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนถ่านไมยราบยักษ์ ถ่านเปลือกมังคุด ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุดมีค่า ΔH° เป็นบวก แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน คือจะเกิดการดูดซับได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากตาราง 14 แสดงค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งได้แก่ค่า พลังงานอิสระ (ΔG°), ค่าความร้อนหรือ enthalpy (ΔH°) และค่า entropy (ΔS°) ในการดูดซับสีแดง พบว่าค่า ΔG° ทั้ง 3 อุณหภูมิของตัวดูดซับทุกชนิด มีค่า ΔG° เป็นลบทั้งหมด แสดงว่าการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 30 °C และ 40 °C ของถ่านกัมมันต์มาตรฐาน และที่อุณหภูมิ 20 °C ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ไม่สามารถหาค่า ΔG° ได้ เนื่องจากค่า K ใน Langmuir model มีค่าเป็นลบทำให้ไม่สามารถหาค่า $\ln K$ ได้ และเมื่อพิจารณาค่า ΔH° พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่านเปลือกมังคุด และถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด มีค่า ΔH° เป็นลบ แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน คือจะเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ส่วน ถ่านไมยราบยักษ์, ถ่านเมล็ดมะขาม, ถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์ และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีค่า ΔH° เป็นบวก แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน คือจะเกิดการดูดซับได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากตาราง 15 แสดงค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งได้แก่ค่า พลังงานอิสระ (ΔG°), ค่าความร้อนหรือ enthalpy (ΔH°) และค่า entropy (ΔS°) ในการดูดซับสีน้ำเงิน พบว่าค่า ΔG° ทั้ง 3 อุณหภูมิของตัวดูดซับทุกชนิด มีค่า ΔG° เป็นลบทั้งหมด แสดงว่าการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ และเมื่อพิจารณาค่า ΔH° พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน และถ่านกัมมันต์ไมยราบยักษ์มีค่า ΔH° เป็นลบ แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน คือจะเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนถ่านไมยราบยักษ์ ถ่านเปลือกมังคุด ถ่านเมล็ดมะขาม ถ่านกัมมันต์เปลือกมังคุด และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีค่า ΔH° เป็นบวก แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน คือจะเกิดการดูดซับได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาค่าเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสี (เหลือง, แดง, น้ำเงิน) และทั้ง 3 อุณหภูมิ (20 °C 30 °C 40 °C) ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน, ถ่าน และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ($-\Delta G^\circ$) ส่วนการดูดซับจะเป็นแบบดูดความร้อน ($+\Delta H^\circ$) หรือคายความร้อน ($-\Delta H^\circ$) นั้นขึ้นอยู่กับโทนสีและชนิดของตัวดูดซับ สำหรับค่า ΔS° ส่วนมากจะมีค่าเป็นบวก แต่ในการดูดซับโทนสีเหลือง ด้วยถ่านกัมมันต์มาตรฐาน และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม, การดูดซับโทนสีแดงด้วย ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน และ ถ่านเปลือกมังคุด รวมทั้ง การดูดซับโทนสีน้ำเงินด้วย ถ่าน กัมมันต์ไมยราบยักษ์นั้น จะมีค่า ΔS° เป็นลบ ซึ่งทั้งนี้ค่า ΔS° ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและพลังงานอิสระในการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ

