บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการใช้สารดูดซับที่ผลิตขึ้นจากเปลือกมันสำปะหลัง ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยทำการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง และนำมาทดลองกำจัดสีกับน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเป็นน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง (C.I. Reactive 180) มวลโมเลกุล 801 ที่ความเข้มข้นน้ำเสียคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง การทดลองได้แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ การเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังในการกำจัดสีย้อม การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับที่เหมาะสม และการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorption Column)

4.1 ผลการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

การศึกษานี้ได้ทำการเตรียมสารดูดซับโดยใช้เปลือกมันสำปะหลังที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมาผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเตรียมสารดูดซับที่มีวิธีการเตรียมแตกต่างกัน 3 วิธี คือ

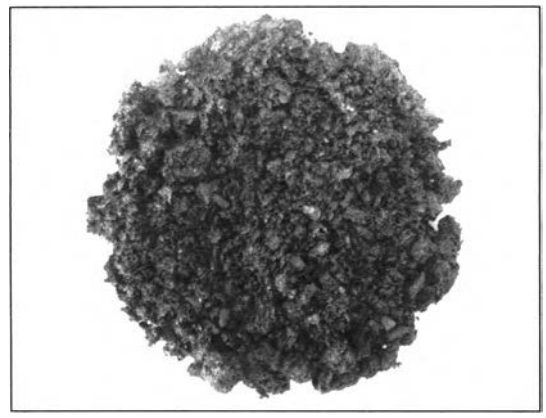
สารดูดซับแบบที่ 1 - เผาที่อุณหภูมิ 500°C ที่สภาวะอับอากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สารดูดซับแบบที่ 2 - แช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริก เผาที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แช่ในสารละลาย $NaHCO_3$

สารดูดซับแบบที่ 3 - แช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริก เผาที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำร้อน

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 คุณสมบัติของสารดูดซับ และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) ของสารดูดซับทั้ง 3 แบบ แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง

ลักษณะโดยทั่วไปของสารดูดซับ มีลักษณะแตกต่างกับเปลือกมันสำปะหลังก่อนการทดลอง สารดูดซับที่ได้มีสีดำ มีขนาดเล็กลง มีความแข็ง แต่เปราะ มีลักษณะคล้ายถ่านทั่วไป นำมาบดได้ง่าย

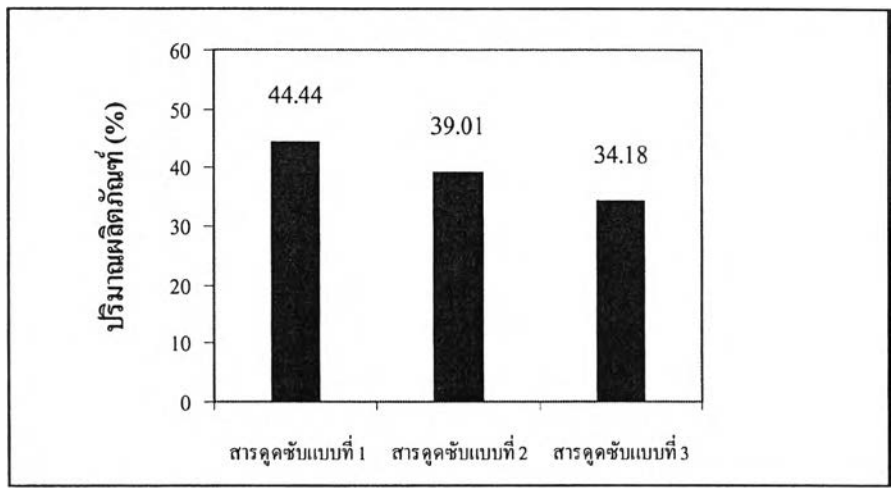
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

ลักษณะสมบัติ	สารดูดซับแบบที่ 1	สารดูดซับแบบที่ 2	สารดูดซับแบบที่ 3
ปริมาณเถ้า (%)	4.4	4.7	4.8
สารดูดซับที่ผลิตได้ (%)	44.44	39.01	34.18
ไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	195	460	473
พื้นที่ผิว (m^2/g)	-	-	354.99
ปริมาตรโพรง (cm^3/g)	-	-	0.2552

จากตารางปริมาณเถ้าของสารดูดซับทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 4.4%, 4.7% และ4.8% สำหรับสารดูดซับแบบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งการหาปริมาณเถ้า เป็นการหาปริมาณสารอนินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูง และปนเปื้อนอยู่ในถ่าน เถ้าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลง เนื่องจากมีเถ้าอุดตันอยู่ในรูพรุน สำหรับถ่านกัมมันต์นั้นถ้ามีค่าเถ้าสูงจะมีราคาต่ำลง เพราะน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ซื้อขายกันนั้นมิใช่น้ำหนักจริง แต่มีน้ำหนักของเถ้าผสมอยู่ด้วย โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเถ้าของเปลือกมันสำปะหลังกับวัสดุอื่นที่ได้มีการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส 6.4% และกะลามะพร้าว 9.5% พบว่าสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมีปริมาณเถ้าน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกรรมวิธีการผลิตที่ต่างกัน สารดูดซับแบบที่ 1 เผาที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งสูงกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 ที่เผาที่อุณหภูมิ

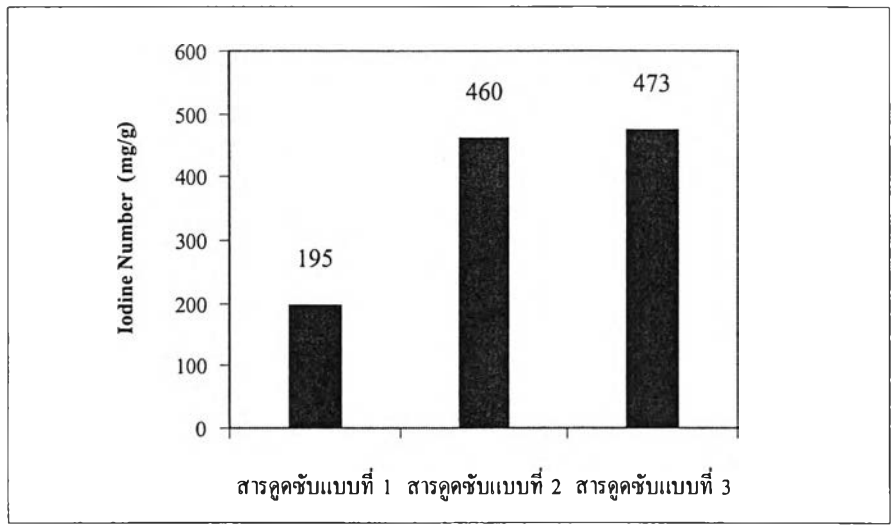
350°C จึงมีปริมาณเถ้าน้อยกว่า และสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีปริมาณเถ้าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และกะลามะพร้าว เพราะสารดูดซับทั้ง 2 แบบผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายชนิดกรด ซึ่งสารละลายชนิดกรดจะช่วยล้างเถ้าออกได้ ช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น

ค่าปริมาณสารดูดซับหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากผลการเตรียมพบว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดน้อยลงไป ปริมาณร้อยละของสารดูดซับที่ผลิตได้ 3 แบบ แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารดูดซับแบบที่ 1 มีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้สูงสุดคือ 44.44% รองลงมาคือสารดูดซับแบบที่ 2 39.01% และสารดูดซับแบบที่ 3 มีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยสุดคือ 34.18%



รูปที่ 4.2 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีการเตรียมสารดูดซับ 3 แบบ

ในกระบวนการผลิตสารดูดซับ มีการใช้สารเคมีช่วยในขั้นตอนการกระตุ้นให้เปลือกมันสำปะหลังมีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้เพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้น เนื่องจากสารละลายกรดสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้ด้วยตัวของมันเอง และกรดฟอสฟอริกยังมีความสามารถในการดูดความชื้น อันเป็นการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนไอออนได้อีกทางหนึ่งด้วย



รูปที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับจากกรรมวิธีการเตรียมสารดูดซับ 3 แบบ

จากผลการทดลองพบว่า เปลือกมันสำปะหลังเมื่อนำมาเผาให้เป็นถ่านคือสารดูดซับแบบที่ 1 ที่ไม่ผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 195 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังรูปที่ 4.3 และเมื่อผ่านขั้นตอนการกระตุ้นโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกต่อเปลือกมันสำปะหลัง โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 สารดูดซับที่ผลิตได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงขึ้นเป็น 460 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 473 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ในการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการทำปฏิกริยาเคมีกับสารละลายชนิดกรด จำเป็นต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวออก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเตรียมสารดูดซับที่มีขั้นตอนการล้างสารเคมีออกต่างกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิว คือการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเพื่อล้างสารละลายกรดฟอสฟอริกที่เหลือออกเป็นสารดูดซับแบบที่ 2 และการล้างสารดูดซับด้วยน้ำร้อนซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มานานเป็นสารดูดซับแบบที่ 3 พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับแบบที่ 3 คือ 473 มิลลิกรัมต่อกรัม สูงกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 คือ 460 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากการเตรียมสารดูดซับแบบที่ 2 เพียงแช่สารดูดซับจากการเผาในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงและวัดค่าพีเอชโดยกระดาษลิตมัสไม่เปลี่ยนสี ซึ่งต่างจากสารดูดซับแบบที่ 3 ที่ล้างด้วยน้ำร้อนและล้างหลายๆ ครั้งจึงทำให้สารที่ตกค้างอยู่ออกจากรูพรุนได้มากกว่า จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นคุณสมบัติประการหนึ่งของถ่านกัมมันต์ที่ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีโมเลกุลต่ำ ซึ่งระบุอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก. 900-2532) ที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่น้อยกว่า 600 เมื่อพิจารณาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง พบว่าการเตรียมสารดูดซับแบบที่ 1 ไม่ผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวสารดูดซับที่ได้จึงมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์อยู่ใน

เกณฑ์น้อย สารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีคือสารละลายกรดฟอสฟอริก ไอโอดีนนัมเบอร์น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ และเมื่อนำค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมาเปรียบเทียบกับถ่านที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังกับถ่านชนิดอื่นๆ

วัตถุดิบ	สารเคมีที่ใช้	อุณหภูมิ (^{o}C)	ไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	อ้างอิง
เปลือกมันสำปะหลัง	กรดฟอสฟอริก	350	460-473	ผู้วิจัย
กะลามะพร้าว	กรดซัลฟิวริก	ไม่เกิน 200	223.2-366.27	สุทธินนท์ ศักดิ์สวัสดิ์ (2543)
กะลามะพร้าว	ซิงค์คลอไรด์	500	898	กฤติยา เสือสีนาค (2542)
กะลามะพร้าวและเปลือกข้าว	ซิงค์คลอไรด์	300-800	152.5-249.9	วิบูรณ์ โสภณกิจโกศล ภาวิณี วุฒิกุล (2539)
ซังข้าวโพด	ซิงค์คลอไรด์	400-800	800-1075	พงศธร โค้วคชาภรณ์ (2538)

สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350 ^{o}C มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่า ถ่านกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก และถ่านกะลามะพร้าวและเปลือกข้าวที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ แต่ถ่านกะลามะพร้าว และซังข้าวโพดที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์มีค่าสูงกว่าสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

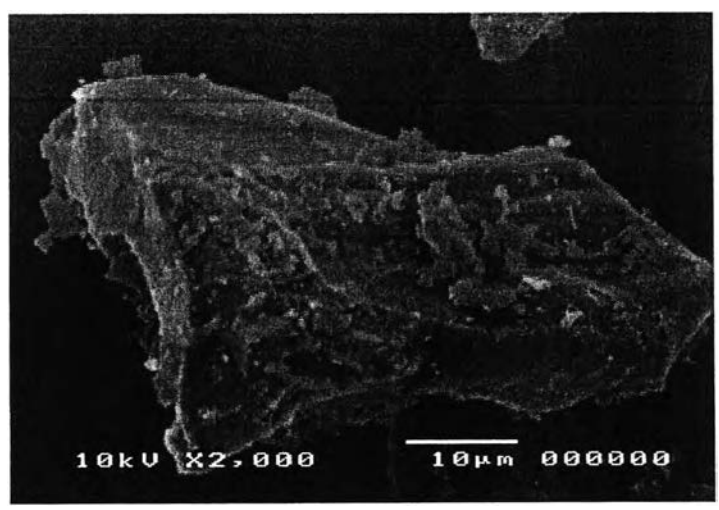
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของสารดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน (Scanning Electron Microscope)

นำสารดูดซับที่มีกรรมวิธีการเตรียมต่างกัน 3 แบบ สารดูดซับแบบที่ 1 เผาเปลือกมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 500^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สารดูดซับแบบที่ 2 แช่เปลือกมันสำปะหลังในสารละลายกรดฟอสฟอริก เผาที่อุณหภูมิ 350^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นแช่ในสารละลาย $NaHCO_3$ เพื่อเป็นการล้างสารละลายกรดฟอสฟอริกที่เหลืออยู่ออกจากสารดูดซับ และสารดูดซับแบบที่ 3 มี

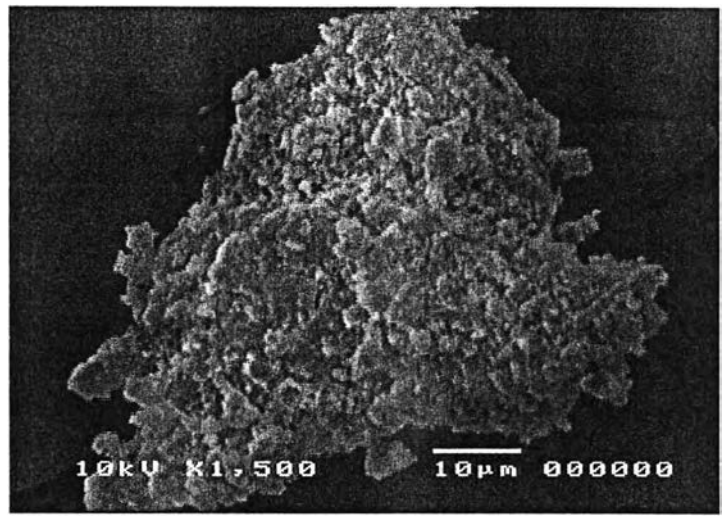
กรรมวิธีเช่นเดียวกับสารดูดซับแบบที่ 2 แต่ในขั้นตอนการล้างกรดที่เหลืออยู่ออกจากสารดูดซับใช้น้ำร้อนแทน โดยใช้สารดูดซับที่ผ่านการบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้ในการทดลองแบบแบชท์ (Batch) ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของสารดูดซับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 2,000-3,500 เท่า

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกรรมวิธีต่างๆ กัน ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตอนสามารถทำให้มองเห็นรายละเอียดของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่าน และช่วยในการสนับสนุนการวิเคราะห์และวิจารณ์ เช่น มีจำนวนรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้น รูพรุนมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.6

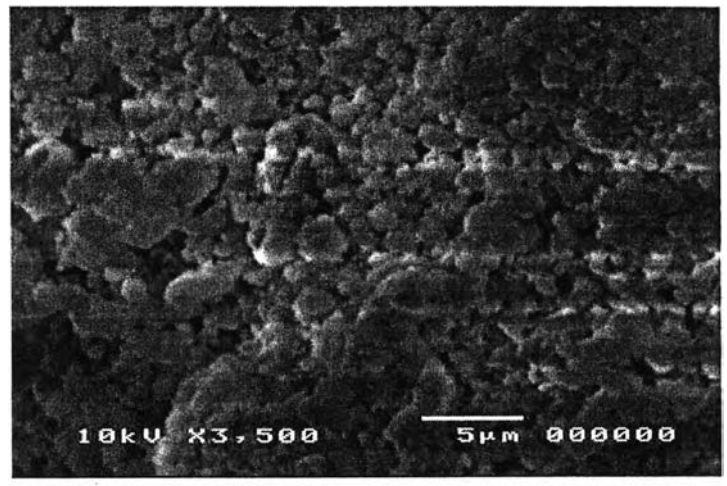
รูปที่ 4.4 – 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ 3 แบบ ในรูปที่ 4.4 เป็นสารดูดซับแบบที่ 1 ซึ่งเป็นการเผาเปลือกมันสำปะหลังให้กลายเป็นถ่าน โดยไม่มีการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นผิวโดยในรูปใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่าพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีลักษณะค่อนข้างเรียบไม่มีรูพรุน รูปที่ 4.5 คือสารดูดซับแบบที่ 2 ที่มีการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกและล้างกรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ลักษณะพื้นที่ผิวมีความขรุขระ และพบว่ามีรูพรุนกระจายตัวอยู่บ้างเพิ่มขึ้นจากสารดูดซับแบบที่ 1 และรูปที่ 4.6 สารดูดซับแบบที่ 3 ล้างสารละลายกรดด้วยน้ำร้อน ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่าพื้นที่ผิวมีความขรุขระ และพบรูพรุนกระจายตัวเพิ่มมากกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 ขนาดรูพรุนก็มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับแต่ละแบบ กล่าวคือสารดูดซับแบบที่ 3 พบว่ามีรูพรุนกระจายตัวอยู่มากกว่า และสารดูดซับแบบที่ 1 ที่ไม่พบเห็นรูพรุนเลย ค่าการดูดซับไอโอดีนของสารดูดซับแบบที่ 3 ก็มีค่ามากกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 และสารดูดซับแบบที่ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับแบบที่ 1



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับแบบที่ 2



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับแบบที่ 3

4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง ในการกำจัดสีย้อม

การทดลองนี้เป็นการทดลองนำสารดูดซับที่เตรียมขึ้นทั้ง 3 แบบมาทดสอบความเป็นไปได้ในการนำสารดูดซับมากำจัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง (C.I. Reactive 180) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบแบชท์ (Batch) โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 20 มิลลิลิตรลงในภาชนะที่มีฝาปิด และใส่สารดูดซับที่มีปริมาณต่างๆ กัน 6 ค่าทั้ง 3 ชนิด นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาวัดพีเอช และหาความ

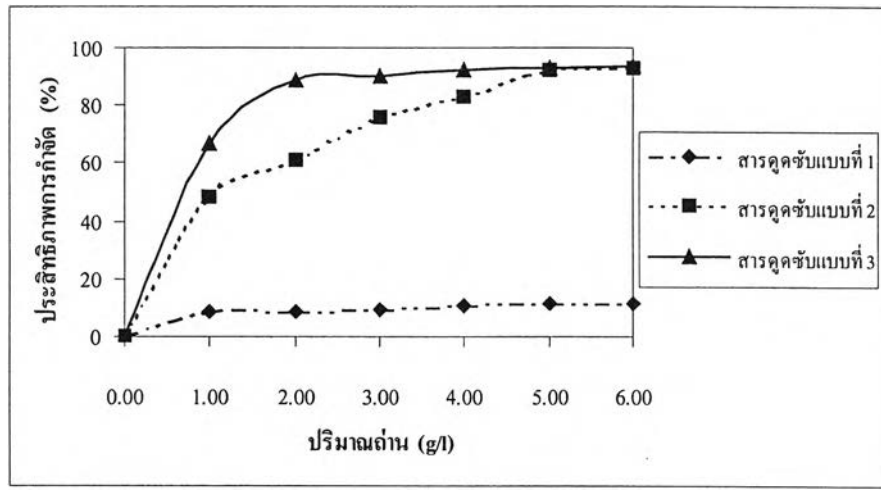
เข้มข้นสีเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเป็นไปได้ และแนวโน้มของการกำจัดสีของสารดูดซับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับ 3 ชนิด

ปริมาณสาร (g/l)	สารดูดซับแบบที่ 1			สารดูดซับแบบที่ 2			สารดูดซับแบบที่ 3		
	pH	Conc. (mg/l)	% removal	pH	Conc. (mg/l)	% removal	pH	Conc. (mg/l)	% removal
1.00	5.86	91.56	8.43	5.96	51.55	48.45	5.22	33.53	66.47
2.00	5.86	91.57	8.43	5.48	38.76	61.24	4.63	11.19	88.81
3.00	5.72	90.50	9.50	5.25	24.17	75.83	4.53	9.81	90.19
4.00	5.89	89.27	10.73	5.22	16.96	83.05	4.33	7.99	92.01
5.00	5.93	88.69	11.31	5.20	8.04	91.96	4.12	7.33	92.68
6.00	5.94	88.65	11.35	5.16	7.31	92.69	4.06	6.07	93.93

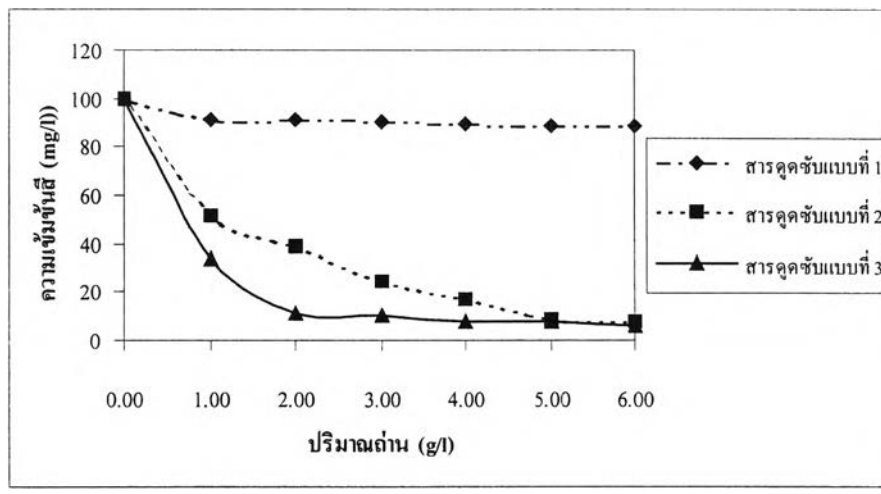
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารดูดซับ 3 แบบดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้น มีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสารดูดซับ 3 แบบ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดเมื่อปริมาณสารดูดซับสูงสุด 6 กรัมต่อลิตรเช่นเดียวกันทั้ง 3 แบบ แต่สารดูดซับแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีค่อนข้างต่ำโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดคือ 11.35% ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจน จากประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันคือ 92.69% และ 93.93% เนื่องจากสารดูดซับแบบที่ 1 ทำการเผาที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นถ่านธรรมดา โดยไม่ได้ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวต่ำกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกทำให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากกว่า และเมื่อพิจารณาในช่วงความเข้มข้นของสารดูดซับ 1 – 4 กรัมต่อลิตร เส้นกราฟของสารดูดซับแบบที่ 3 มีความชันมากกว่า คือมีแนวโน้มการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นจาก 66.47% เป็น 88.80%, 90.19% และ92.01% ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารดูดซับแบบที่ 2 เพิ่มขึ้นจาก 48.45%, 61.24%, 75.83% และ 83.05% และที่ความเข้มข้นสารดูดซับตั้งแต่ 5 กรัมต่อลิตร ประ

สิทธิภาพการกำจัดสีของสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 91.96% และ 92.68% ตามลำดับ



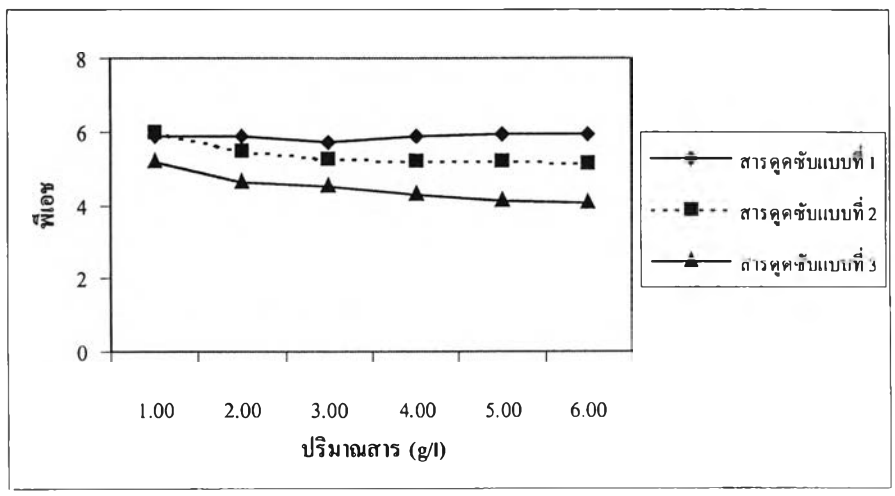
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ของสารดูดซับ 3 แบบที่ปริมาณต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสีที่คงเหลือในน้ำเสีย ดังรูปที่ 4.8 ความเข้มข้นสีของสารดูดซับแบบที่ 1 ลดลงจากเดิมเพียงเล็กน้อย สังเกตจากลักษณะกราฟที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง ความเข้มข้นของสีจากเดิม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้สารดูดซับปริมาณมากที่สุด 6 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสีคงเหลือต่ำสุด 88.65 มิลลิกรัมต่อลิตร สารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีกว่า ความเข้มข้นของสีคงเหลือต่ำสุด ที่ปริมาณสารดูดซับ 6 กรัมต่อลิตร คือ 7.31 และ 6.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความเข้มข้นสีในน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดด้วยสารดูดซับ 3 แบบ

เมื่อพิจารณาถึงค่าพีเอชของน้ำเสียภายหลังการทดลอง ซึ่งน้ำเสียก่อนการทดลองมีพีเอชอยู่ที่ 5.86 พบว่าสารดูดซับแบบที่ 1 ภายหลังการทดลองพีเอชน้ำเสียไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารดูดซับที่ใส่ และค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 5-6 เช่นเดียวกับสารดูดซับแบบที่ 2 สำหรับสารดูดซับแบบที่ 3 ค่าพีเอชลดลงตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดติดผิวของไอออนอื่นๆ มีผลมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบ ที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดติดผิว โดยทั่วไปแล้วการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง สารดูดซับแบบที่ 3 น้ำเสียมีค่าพีเอชต่ำลงตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.9

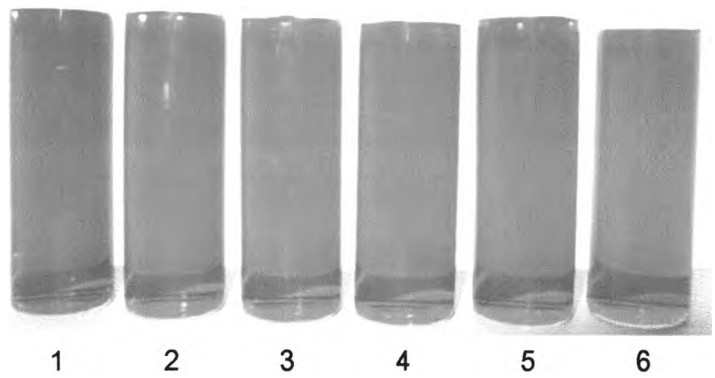


รูปที่ 4.9 พีเอชของน้ำเสียจากการดูดติดผิวด้วยสารดูดซับ 3 แบบ

เนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งในเรื่องของสียังไม่ได้มีการระบุเป็นค่าที่ชัดเจน เพราะกฎหมายกำหนดแต่เพียงว่า สีที่ออกมาจากน้ำทิ้งของโรงงานต้องไม่เป็นสีที่เป็นที่น่ารังเกียจเท่านั้น (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กองมาตรฐาน คุณภาพน้ำ, 2534) ดังนั้นจากการทดลองเมื่อพิจารณาลักษณะสีที่มองเห็นภายหลังการกำจัดสี ด้วยกระบวนการดูดติดผิวของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง แสดงให้เห็นลักษณะของสีเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง

รูปที่ 4.10 - 4.12 แสดงสีของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดด้วยสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง 3 แบบ ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะสีของน้ำเสียมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดสี และความเข้มข้นของสี ที่แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ กล่าวคือสารดูดซับแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ต่ำ และเส้นกราฟมีความชันน้อยคือแนวโน้มการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความเข้มข้นของสี 91.58, 91.57, 90.50, 89.27, 88.69 และ 88.65 มิลลิกรัมต่อลิตร

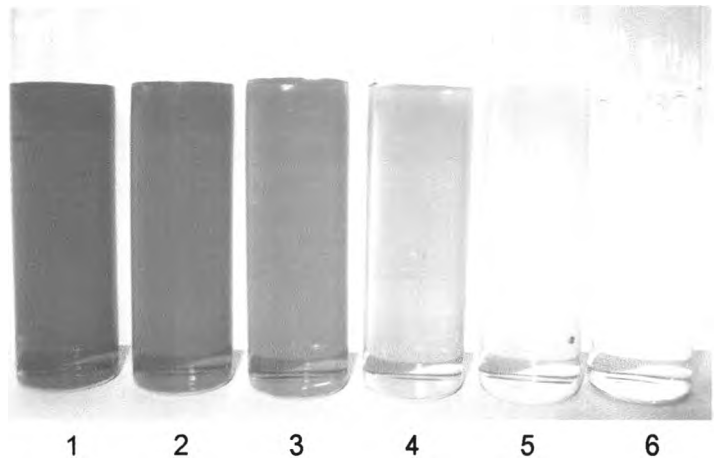
ตามลำดับ ดังในรูปที่ 4.10 (1-6) จะเห็นได้ว่าสีของน้ำเสียยังมีสีแดงอย่างเห็นได้ชัด และสีอ่อนลงเล็กน้อยตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.10 น้ำเสียภายหลังการกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 1

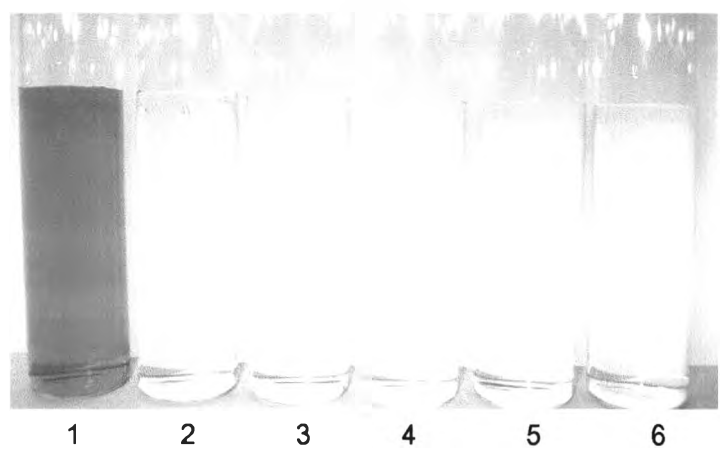
1) ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร
2) ปริมาณสารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร
3) ปริมาณสารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร
4) ปริมาณสารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร
5) ปริมาณสารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร
6) ปริมาณสารดูดซับ 6 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.11 แสดงสีของน้ำเสียภายหลังการกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 2 เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสี พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นสีลดลงตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น สีน้ำเสียที่มองเห็นภายหลังการทดลองจึงจางลงตามลำดับ ความเข้มข้นของสีที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียเรียงลำดับจากรูปที่ 4.11 (1-6) คือ 51.55, 38.76, 24.17, 16.96, 8.04 และ 7.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงลักษณะสีที่ผ่านการกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 3 โดยความเข้มข้นของสีที่คงเหลือเรียงลำดับจากรูปที่ 4.12 (1) - 4.12 (6) คือ 33.53, 11.194, 9.81, 7.99, 7.33 และ 6.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟประสิทธิภาพการกำจัด และความเข้มข้นของสีของสารดูดซับแบบที่ 3 ที่มีความชันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของสารดูดซับแบบที่ 2 ก็จะเห็นลักษณะสีน้ำเสียที่สอดคล้องกัน คือสีน้ำเสียจากการกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 2 สีจางลงทีละน้อยต่างจากสารดูดซับแบบที่ 3 ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้นอย่างชัดเจน สีน้ำเสียจางลงได้อย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ใช้ปริมาณสารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.11 น้ำเสียภายหลังการกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 2

1) ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร
2) ปริมาณสารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร
3) ปริมาณสารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร
4) ปริมาณสารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร
5) ปริมาณสารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร
6) ปริมาณสารดูดซับ 6 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.12 น้ำเสียภายหลังการกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 3

1) ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร
2) ปริมาณสารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร
3) ปริมาณสารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร
4) ปริมาณสารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร
5) ปริมาณสารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร
6) ปริมาณสารดูดซับ 6 กรัมต่อลิตร

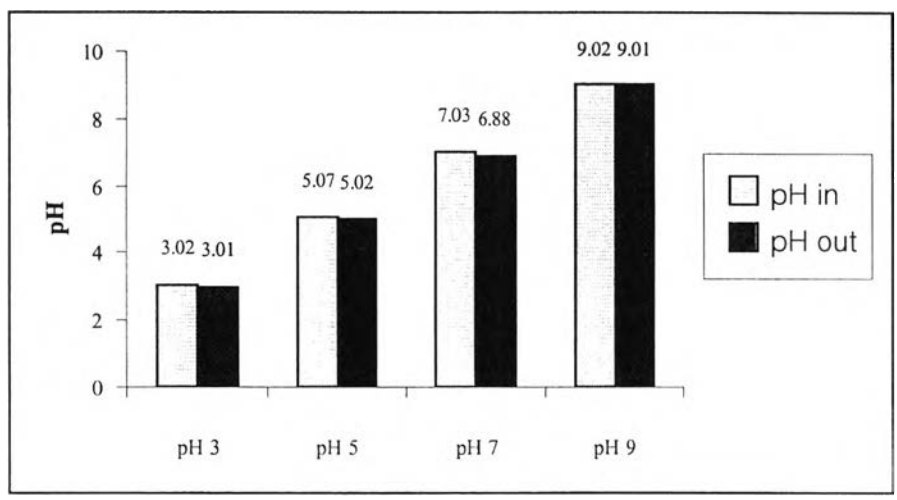
จากผลการทดลองการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง และการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง ในการกำจัดสีย้อม เมื่อพิจารณาถึงชนิดของสารดูดซับที่สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุด พบว่าสารดูดซับแบบที่ 3 มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือสารดูด

ซับแบบที่ 2 และ สารดูดซับแบบที่ 1 ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 3 เพื่อใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดผิว การหาไอโซเทอมการดูดติดผิว และการทดลองแบบต่อเนื่องต่อไป

4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับแบบที่ 3

4.3.1 ผลการทดสอบหาพีเอชที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับแบบที่ 3 โดยพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.86 ในการทดลองทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง 4 ค่า คือพีเอช 3, 5, 7, และ 9 ใช้ปริมาณสารดูดซับ 1-6 กรัมต่อลิตร รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชก่อนและหลังการเติมสารดูดซับพบว่า ค่าพีเอชหลังการเติมสารดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคือค่าพีเอชลดลงเล็กน้อยจากก่อนเติมสารดูดซับ

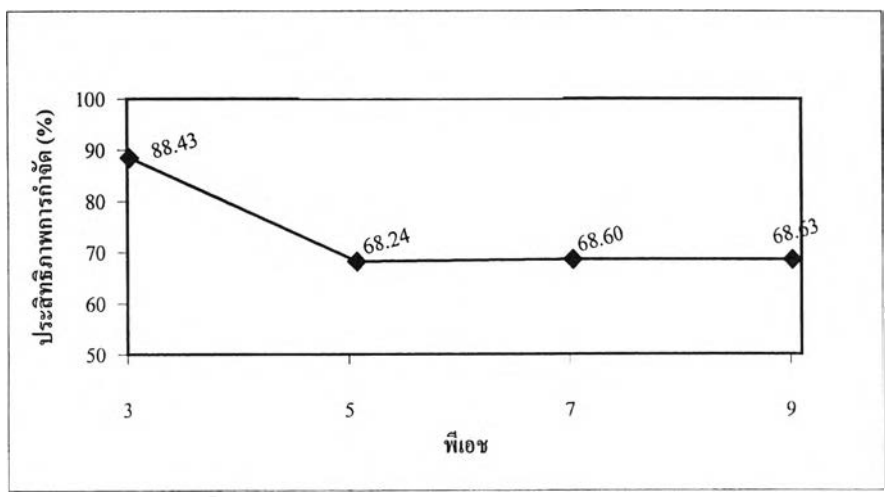


รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบพีเอชของน้ำเสียก่อนและหลังการเติมสารดูดซับ

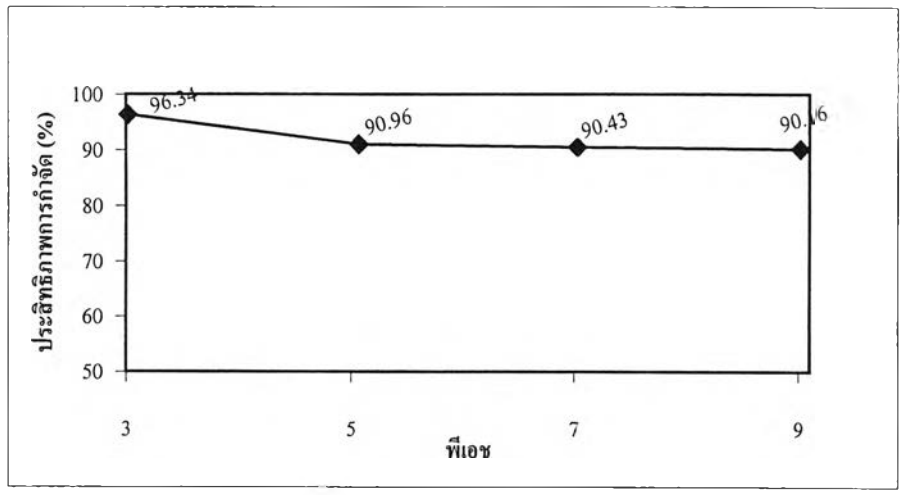
ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวสีย้อมนั้น เป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งในกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว จะทำให้เกิดกลุ่มฟังก์ชั่นนอล (Functional Group) หลายชนิดที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของคาร์บอน วิธีที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของคาร์บอนที่ใช้วิธีการกระตุ้น และออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่างกันนี้ จะใช้คุณสมบัติของกรดและเบสของตัวคาร์บอนเป็นตัวกำหนด คาร์บอนที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะน้อยกว่า 400 $^{\circ}$C ซึ่งจะดูดติดผิวของ

ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-)ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบแอล (L-type Carbon) ส่วนคาร์บอนที่กระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นมากกว่า 750 ^oC และดูดติดผิวของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบเอช (H-type Carbon) จากการทดลองพบว่าพีเอชของสารละลายหลังจากใส่สารดูดซับปริมาณต่างๆ ลงไปมีค่าพีเอชลดลง สารดูดซับชนิดนี้น่าจะมีคุณสมบัติเป็น คาร์บอนแบบแอล (L-type Carbon)

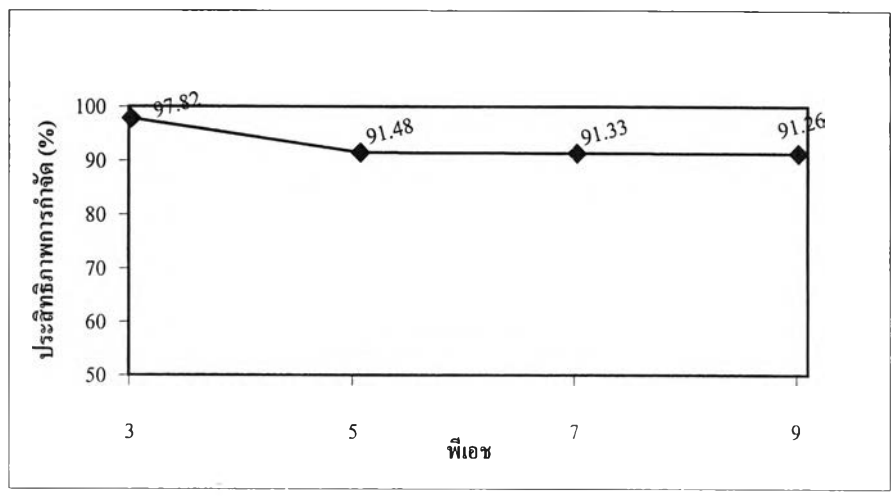
จากรูปที่ 4.14 - รูปที่ 4.19 แสดงผลของพีเอชที่มีต่อเปอร์เซนต์การดูดติดผิวสีย้อมของสารดูดซับในปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับ มีค่าลดลง จากความชันของกราฟซึ่งมีความชัดเจนที่ช่วงพีเอช 3 เพิ่มเป็นพีเอช 5 ที่ปริมาณสารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจากพีเอช 3 เป็น พีเอช 5 ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่นๆ ที่มีค่าลดลงน้อยกว่า โดยสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟในรูป และที่พีเอช 5, 7 และ 9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีทุกปริมาณมีค่าลดลงเล็กน้อย



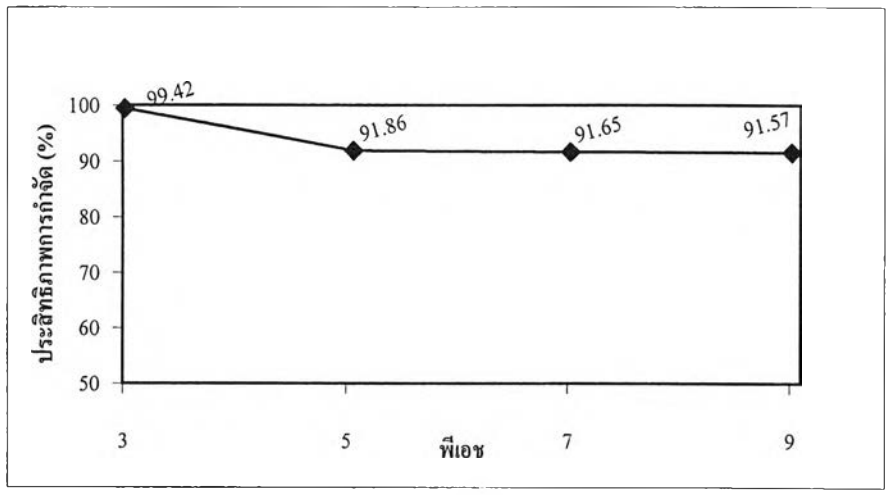
รูปที่ 4.14 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารดูดซับที่ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร



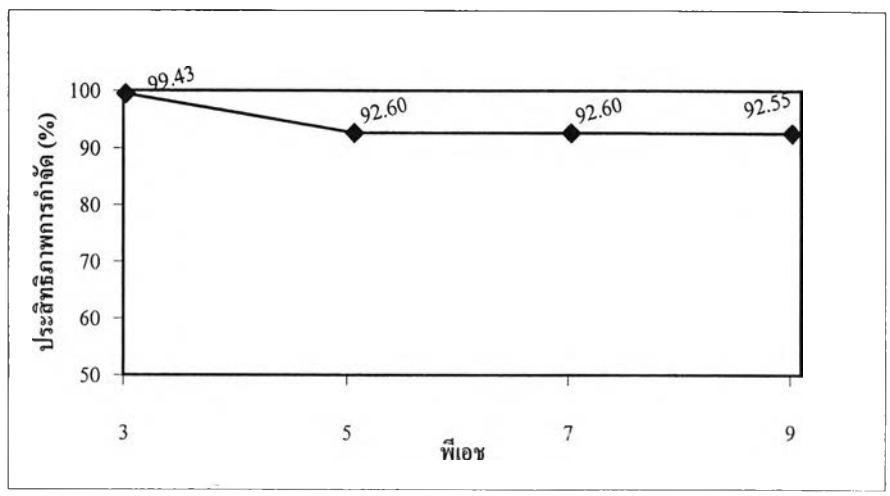
รูปที่ 4.15 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารดูดซับที่ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร



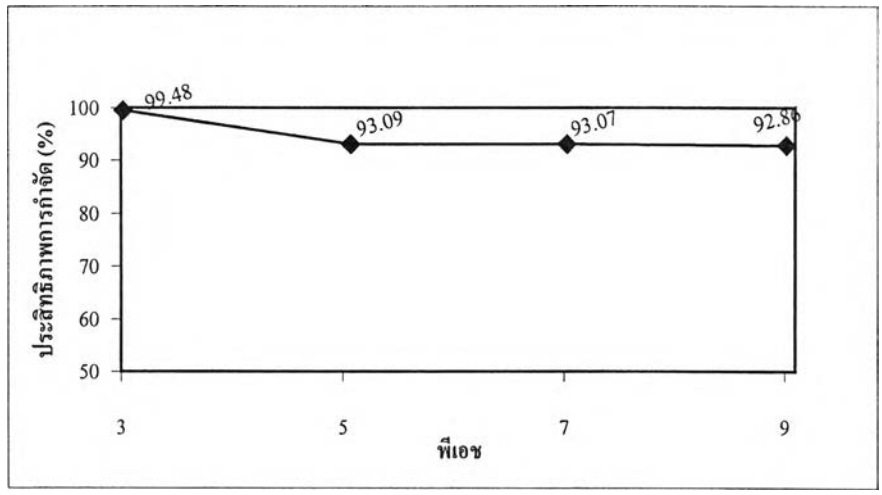
รูปที่ 4.16 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารดูดซับที่ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.17 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารดูดซับที่ปริมาณ 3 กรัมต่อลิตร

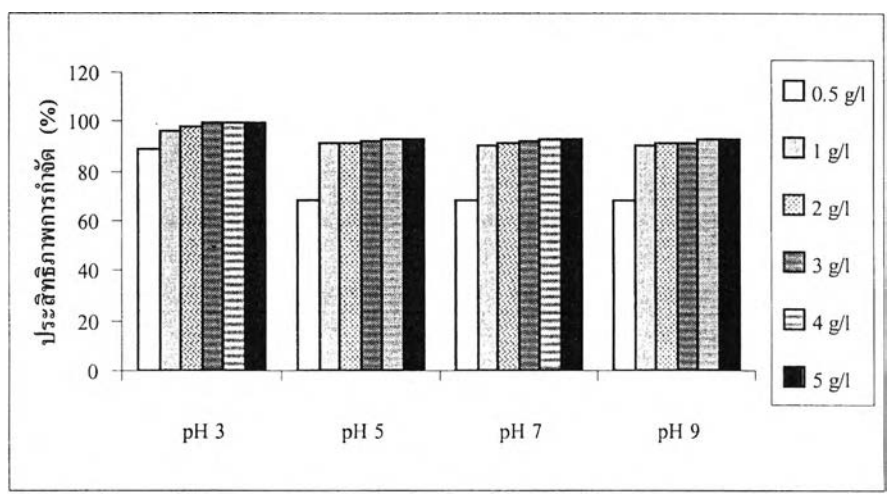


รูปที่ 4.18 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารดูดซับที่ปริมาณ 4 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.19 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารดูดซับที่ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร

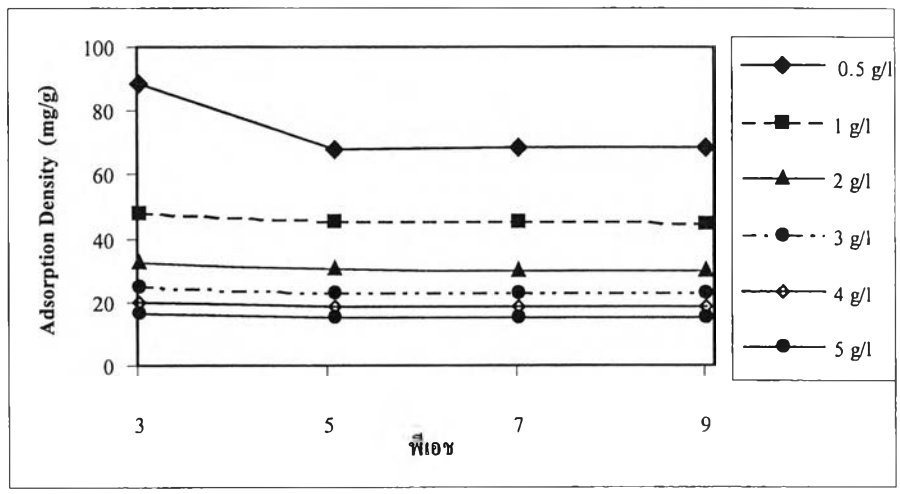
รูปที่ 4.20 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสี ของสารดูดซับทุกปริมาณที่ค่าพีเอช 3, 5, 7 และ 9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่พีเอช 3 มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ค่าพีเอช อื่นๆ สำหรับสารดูดซับทุกปริมาณ และการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากที่ปริมาณสารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับ ปริมาณสารดูดซับต่างๆ ที่มีค่าพีเอชต่างกัน

จากการทดลอง เมื่อนำปริมาณของสีย้อมที่ถูกกำจัดไปต่อปริมาณสารดูดซับที่ใช้ในการทดลอง มาเขียนกราฟแสดงความหนาแน่นของการดูดติดผิวสีย้อมที่พีเอชต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่

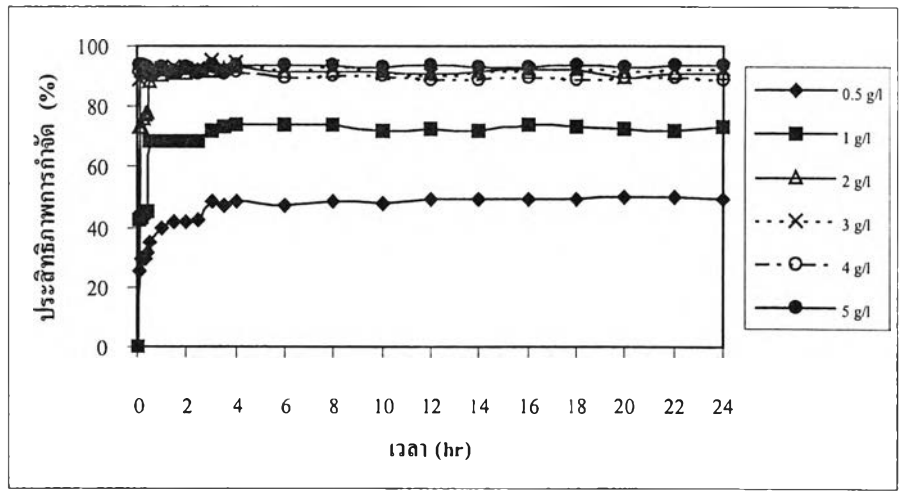
4.21 พบว่าที่ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร พีเอชมีผลต่อความหนาแน่นในการดูดติดผิว คือความหนาแน่นในการดูดติดผิวต่ำลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น แต่ที่ปริมาณสารดูดซับ 2-6 กรัมต่อลิตร พีเอชมีผลต่อความหนาแน่นในการดูดติดผิวน้อยมาก สังเกตจากความชันของกราฟที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง และที่ปริมาณสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นในการดูดติดผิวลดน้อยลง เนื่องจากสารดูดซับเริ่มอิ่มตัวกับปริมาณของสีย้อมที่ถูกกำจัดไป ปริมาณสีย้อมที่ถูกกำจัดมีสัดส่วนน้อยกว่าปริมาณสารดูดซับที่ใส่ลงไปมาก ดังนั้นเมื่อใส่สารดูดซับยิ่งมากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง



รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นของการดูดติดผิวสีย้อมความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของสารดูดซับปริมาณต่างๆ ที่พีเอชต่างๆ

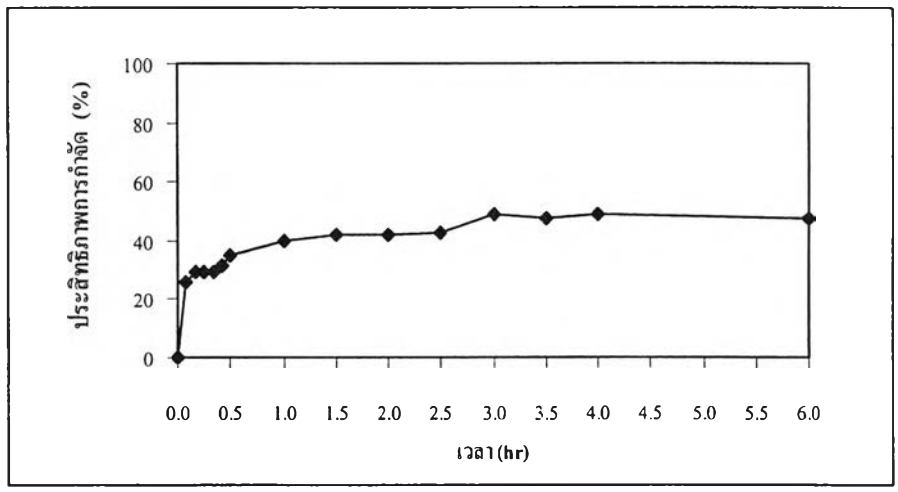
4.3.2 ผลการทดสอบหาเวลาอิ่มตัวในการดูดติดผิว

ทำการทดลองแบบแบชท์ (Batch) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารดูดซับ 6 ค่า คือ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อลิตร เปลี่ยนแปลงเวลา 23 ค่า จนถึง 24 ชั่วโมง เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของการดูดติดผิว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดสีย้อมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และคงที่ตั้งแต่เวลา 6 ชั่วโมงเป็นต้นไป

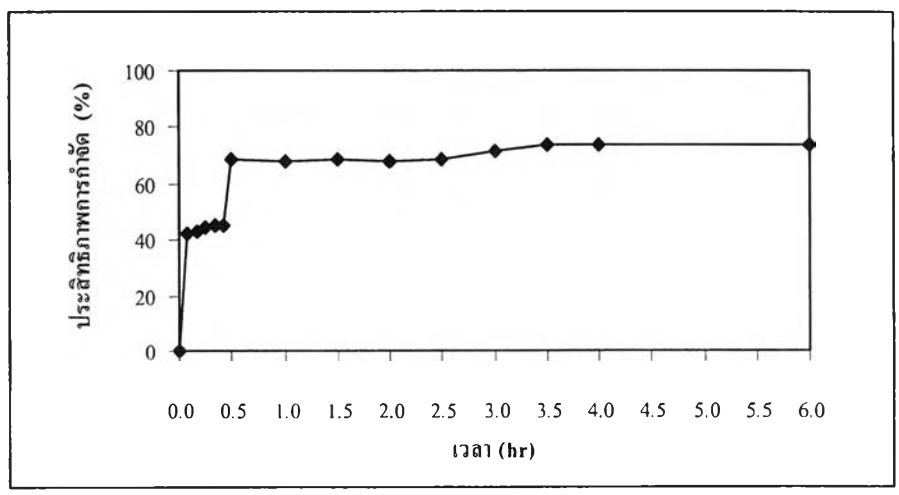


รูปที่ 4.22 ผลของเวลาสัมผัสของการดูดติดผิวสารดูดซับที่ปริมาณต่างๆ

ดังนั้นในรูปที่ 4.23 แสดงผลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ปริมาณต่างๆ โดยพิจารณาถึงแค่ เวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน จากรูปที่ 4.23 กราฟทุกปริมาณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงขึ้น เมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.23(ก) ที่ปริมาณสารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และการดูดติดผิวสีย้อมเข้าสู่สมดุล ประสิทธิภาพการกำจัดสีเริ่มคงที่ที่เวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดสี 48.83% รูปที่ 4.23(ข) ที่ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร ในช่วงเวลาสัมผัส 5-25 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นสูงและคงที่ที่เวลาสัมผัส 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด 68.63% รูปที่ 4.23(ค) ปริมาณสารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร มีลักษณะการดูดติดผิวคล้ายกับ ที่ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงกว่า เวลาสัมผัส 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด 88.19% รูปที่ 4.23(จ) อัตราการกำจัดสีเกิดขึ้นเร็วขึ้นที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 10 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด 91.58% รูปที่ 4.23(จ-ฉ) ปริมาณสารดูดซับ 4 และ 5 กรัมต่อลิตร อัตราการกำจัดสีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 ประสิทธิภาพการกำจัด 91.64% และ 93.79% ตามลำดับ



ก) ปริมาณสารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร



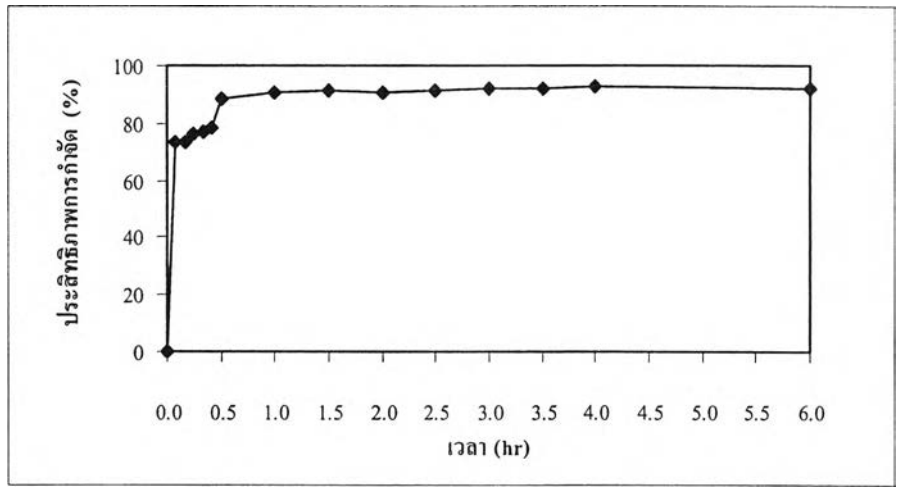
ข) ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ระยะเวลาต่างๆ

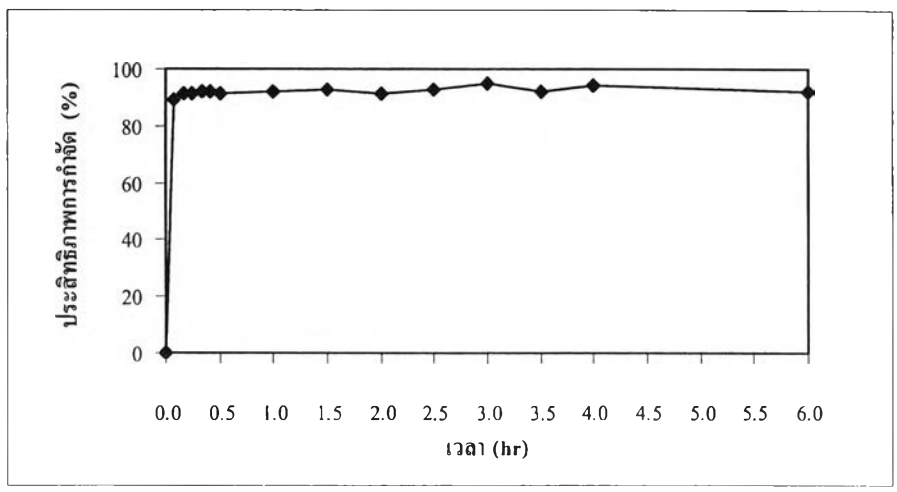
ก) สารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร ข) สารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร

ค) สารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร ง) สารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร

จ) สารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร ฉ) สารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร



ค) ปริมาณสารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร



ง) ปริมาณสารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ระยะเวลาต่างๆ

ก) สารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร

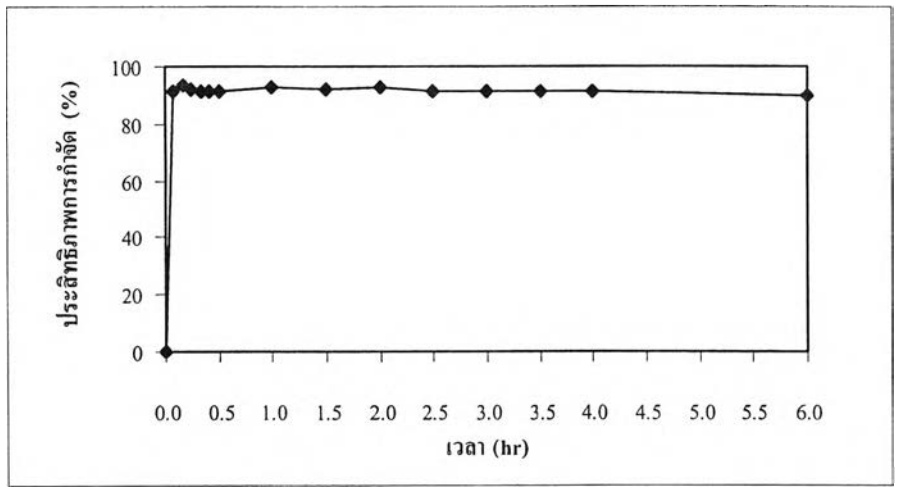
ข) สารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร

ค) สารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร

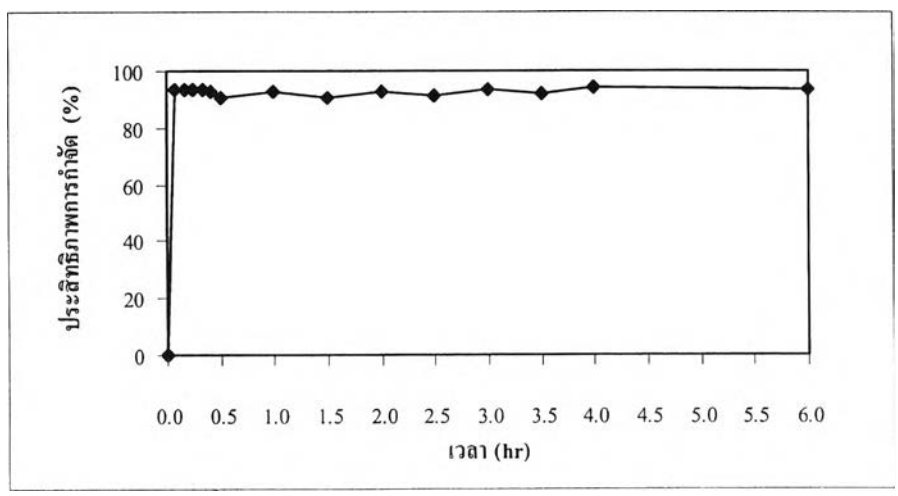
ง) สารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร

จ) สารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร

ฉ) สารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร



จ) ปริมาณสารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร



ฉ) ปริมาณสารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ระยะเวลาต่างๆ

ก) สารดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร
ข) สารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร
ค) สารดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร
ง) สารดูดซับ 3 กรัมต่อลิตร
จ) สารดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร
ฉ) สารดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร

ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารดูดซับที่ปริมาณต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นการเกิดปฏิกริยาจะเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นตามลำดับ และให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการหาไอโซเทอมของสารดูดซับที่ปริมาณต่างๆ ใช้ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่แต่ละเวลาสัมผัสที่การดูดติดผิวเข้าสู่สมดุล

4.3.3 ผลการทดสอบหาไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง

การทดสอบไอโซเทอมของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 3 สำหรับการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง (C.I. Reactive 180) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ผลการทดลองจากการทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของสารดูดซับ ที่เวลาสัมผัสดำเนินไปจนระบบเข้าสู่สมดุลของสารดูดซับที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดติดผิวสีย้อมบนสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

ปริมาณสาร (g)	Time (min)	Absorbance	Conc. (mg/l)	% Removal
0.5	180	0.871	51.166	48.834
1.0	30	0.543	31.370	68.630
2.0	30	0.201	11.812	88.188
3.0	10	0.143	8.417	91.583
4.0	5	0.142	8.364	91.636
5.0	5	0.106	6.215	93.785

ทำการทดสอบไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

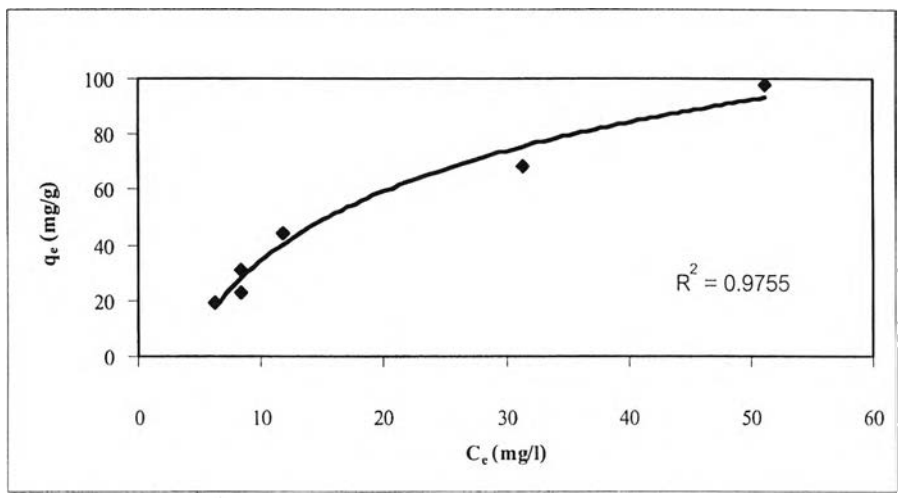
ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ มีแนวความคิดตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับเสมือน ปฏิกริยาเคมีบนพื้นผิวที่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจึงเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว และโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้แล้ว ไม่มีผลกระทบต่อการดูดซับโมเลกุลอื่น สมการความสัมพันธ์คือ

$$q_e = K_L C_e / 1+a_L C_e \quad .....(4.1)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เป็นแบบจำลองสมดุลการดูดซับที่ใช้อธิบายการดูดซับที่สารถูกดูดซับมีพื้นผิวแตกต่างกัน ซึ่งขนาดของการดูดซับขึ้นอยู่กับพลังงานในการดูดซับ ซึ่งมีพลังงานที่ใช้ไม่เท่ากันเสมอไป พลังงานในการดูดซับเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพื้นผิวที่ครอบคลุมถึง ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชเหมาะสมกับการดูดซับแบบหลายชั้น สมการความสัมพันธ์คือ

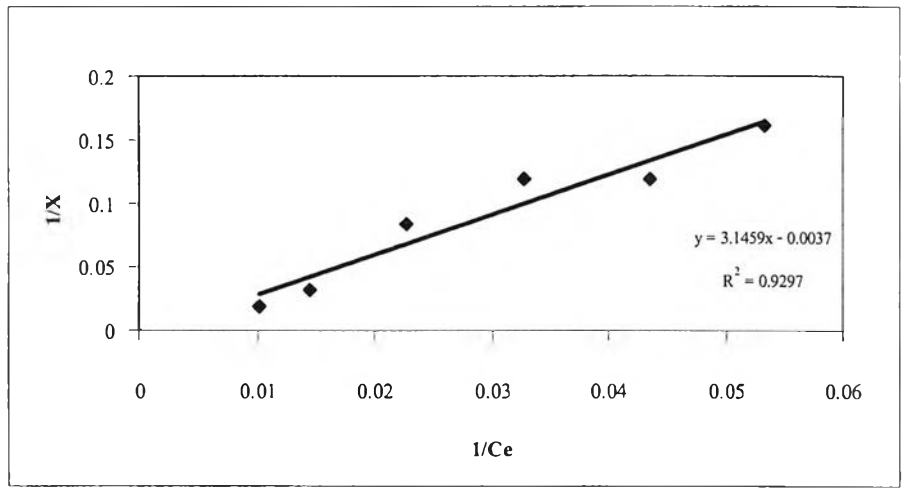
$$q_e = K_F C^{1/n} \quad .....(4.2)$$

ไอโซเทอมการดูดติดผิว สำหรับสีย้อมรีแอกทีฟบนสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 สมดุลการดูดติดผิวของสีย้อมรีแอกทีฟบนสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

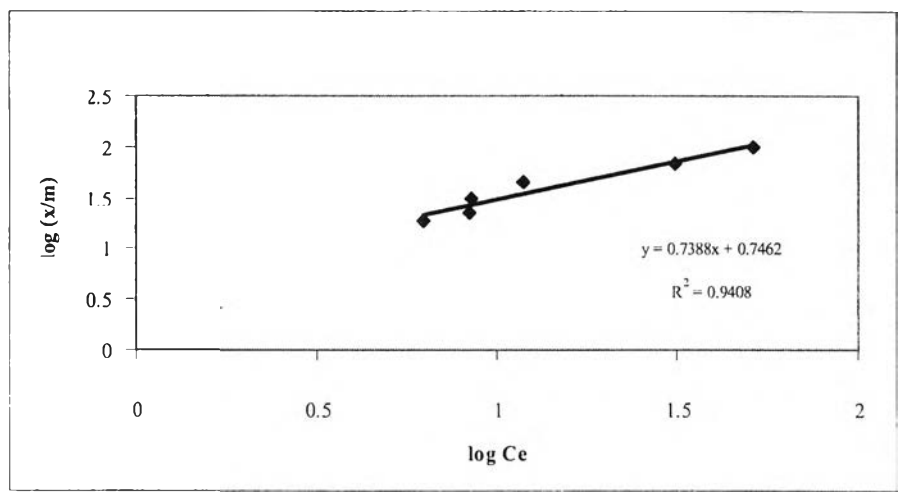
ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ใช้อธิบายสมดุลการดูดติดผิวของการดูดติดผิวสีย้อมบนสารดุดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง เมื่อนำค่าสมดุลการดูดติดผิวมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับแบบแลงมัวร์

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

$$1/X = -0.0037 + 3.1459(1/C_e) \quad \text{....(4.3)}$$



รูปที่ 4.26 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับแบบฟรุนดลิช

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช คือ

$$\log (x/m) = 0.7462 + 0.7388 \log C_e \quad \text{.....(4.4)}$$

ค่าคงที่การดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คำนวณได้จากความชัน และระยะตัดแกนของสมการที่ 4.3 ในขณะที่ค่าคงที่การดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช คำนวณได้จากความชัน และระยะตัดแกนของสมการที่ 4.4 แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่การดูดติดผิวในไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช ของสีรีแอกทีฟด้วยสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

Langmuir isotherm constant					Frundlich isotherm constant		
K_L ($dm^3\ g^{-1}$)	a_L ($dm^3\ mg^{-1}$)	R_L	Q_{max} ($mg\ g^{-1}$)	r^2	K_F ($dm^3\ g^{-1}$)	n	r^2
0.3179	0.00118	0.0305	270.27	0.9297	5.574	1.3535	0.9408

อิทธิพลของรูปแบบไอโซเทอม บอกถึงการดูดติดผิวที่เหมาะสมและไม่เหมาะสม สามารถพิจารณาได้ (Waber and Chakravorti, 1974) โดยพิจารณาจากค่า r^2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสีย้อมรีแอกทีฟของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง สามารถอธิบายได้ทั้งไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ที่มีค่า r^2 ใกล้เคียงกันคือ 0.9297 และ 0.9408 ตามลำดับ

ค่า K_L คือค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ a_L คือค่าคงที่ไอโซเทอม ซึ่งค่า a_L ที่น้อยกว่าของสีย้อมที่ถูกดูดซับ แสดงถึงแรงดึงดูดที่ไปยังตำแหน่งของสีย้อมที่อยู่ตรงข้ามน้อยกว่า ค่า Q_{max} คือค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของสารดูดซับ หรือคือความสามารถในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) ของสารดูดซับกับโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับสารดูดซับสำหรับการดูดติดผิวสีย้อมรีแอกทีฟบนสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง มีค่า Q_{max} 270 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นปริมาณสารสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ จากการศึกษาของ Al-degs และคณะ ในปี 1999 ใช้ถ่านกัมมันต์ Fitrasorb 400 (F 400) กำจัดสี Remazol Reactive Red ทดสอบไอโซเทอมแลงมัวร์ ได้ค่า Q_m 213 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่า R_L เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากสูตร (McKay, 1982)

$$R_L = 1/(1+K_L*Co) \qquad \ldots(4.5)$$

ได้ค่า R_L คือ 0.0305 ซึ่งเป็นค่าที่ชี้วัดรูปแบบของแต่ละไอโซเทอม ค่า $R_L > 1$ คือไม่เหมาะสม, $R_L = 1$ เป็นเส้นตรง, $0 < R_L > 1$ เหมาะสม หรือ $R_L = 0$ ปฏิกิริยาย้อนกลับไม่ได้ สำหรับการทดลองนี้ค่า R_L มีค่ามากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1 ถือว่าเหมาะสม

ค่า K_F คือ ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความหนาแน่นของการดูดติดผิวเมื่อค่าความจุการดูดติดผิวมีค่าเท่ากับ 1 โดยที่ถ้าค่า K มากขึ้นเท่าไร ก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของการดูดติดผิวมากขึ้น ค่า n คือค่าคงที่ของความแตกต่างกันของพื้นผิว ซึ่งถ้ามีค่าน้อยแสดงว่ามีความแตกต่างของพื้นผิวมาก ซึ่งถ้าค่า n มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าสารดูดซับนั้นมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดี ค่า n ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง คือ 1.3535 และค่าความชัน 1/n บอกถึงความสามารถในการดูดติดผิวสีย้อมยิ่งมีความชันมากการดูดติดผิวยิ่งดีขึ้น

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ได้นำมาใช้อธิบายสมดุลการดูดติดผิวของการดูดติดผิวสีย้อม บนสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง ดังนั้นการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นของสารดูดซับในการกำจัดสีย้อม เกิดการดูดติดผิว 2 แบบ ในขณะเดียวกัน คือการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งการดูดติดผิวเกิดขึ้นแบบหลายๆ ชั้น (multilayer) ซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อนโดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร และการดูดติดผิวทางเคมี

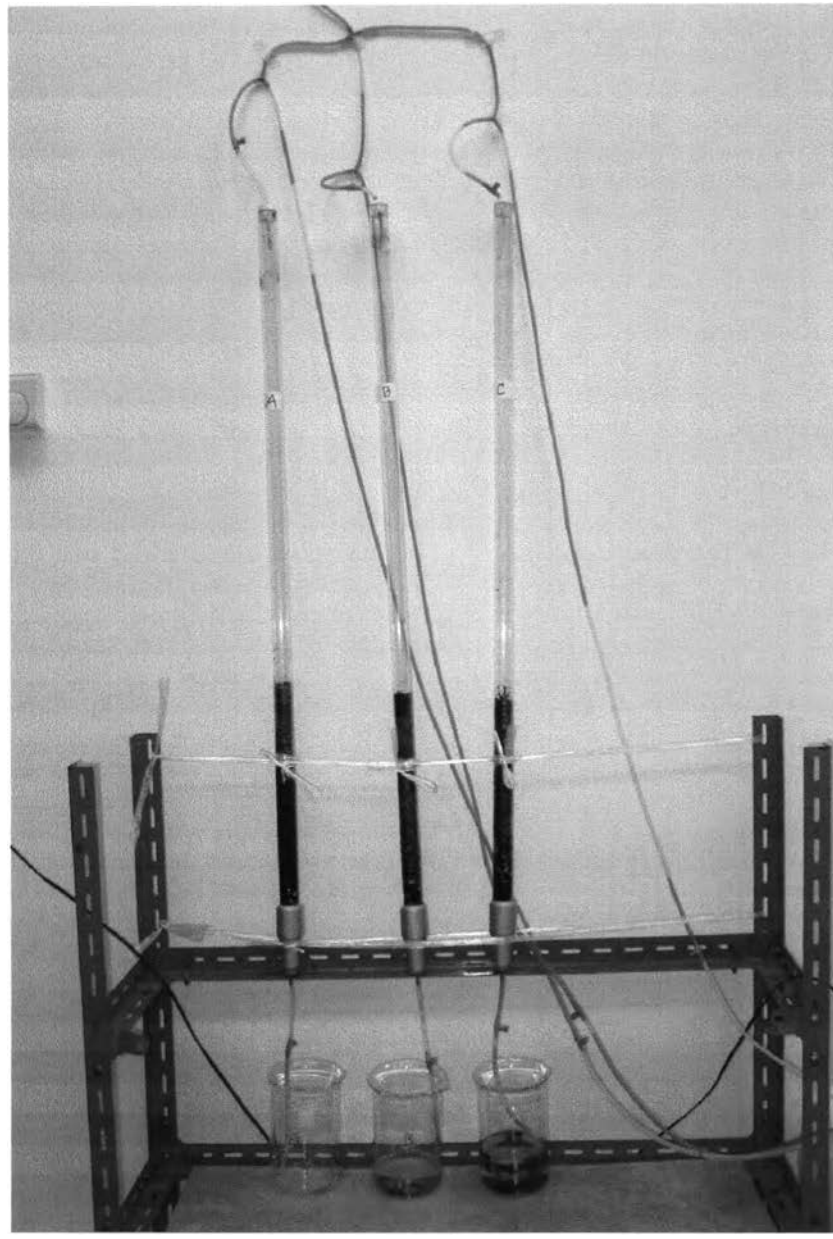
4.4 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorption Column)

การทดสอบการดูดติดผิวของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบต่อเนื่อง ใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร สูง 1 เมตร คิดเป็นปริมาตรตัวกรอง (bed volumn) 0.153 ลิตร ป้อนน้ำเสียแบบไหลลง (Down Flow) โดยแปรผันเวลาสัมผัสถังเปล่า (Empty Bed Contact Time) 3 ค่า คือ 10, 20, และ 30 นาที อัตราการไหลน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 4.6 สารดูดซับที่ใช้ทดลองการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องคือสารดูดซับแบบที่ 3 ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350 ^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และล้างสารละลายกรดออกด้วยน้ำร้อน บดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 และค้างที่ตะแกรงเบอร์ 80 เพื่อคัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ 0.180-0.850 มิลลิเมตร ให้มีความสูงของชั้นสารดูดซับ 0.3 เมตร

ตารางที่ 4.6 การทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

Column	Contact Time (min)	C.I. Reactive 180 Conc. (mg/l)	**อัตราการไหล** (l/hr)
A	10	100	0.910
B	20	100	0.458
C	30	100	0.301

การเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บที่ทางน้ำออก และนำไปทำการวิเคราะห์ หาประสิทธิภาพการกำจัดสี ความเข้มข้นของสีคงเหลือ และพีเอช กำหนดจุดเบรคทรูจ์ที่ความเข้มข้นสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากที่ความเข้มข้นสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะสีของน้ำเสียที่มองเห็นมีสีเข้ม และใกล้เคียงกับลักษณะสีของน้ำเสียก่อนการกำจัดที่มีความเข้มข้นสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นสีมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะสีมีสีเข้ม และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จนแทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.27



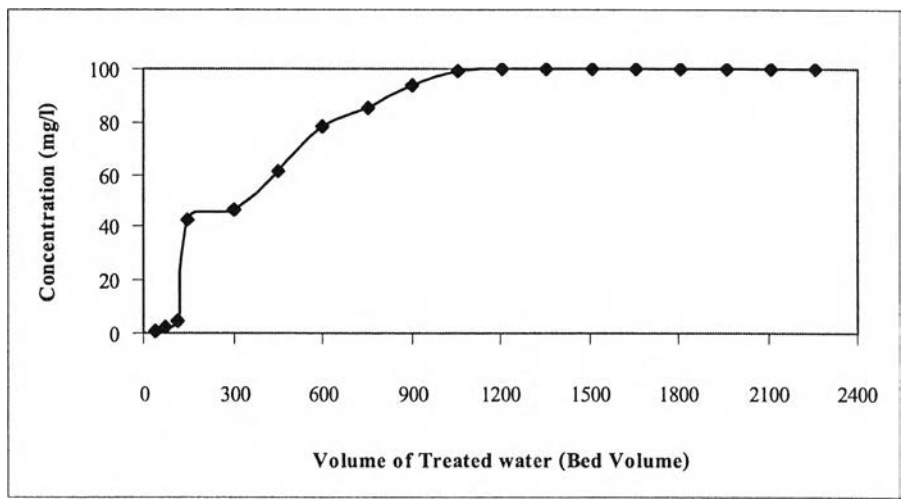
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.27 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง

4.4.1 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที

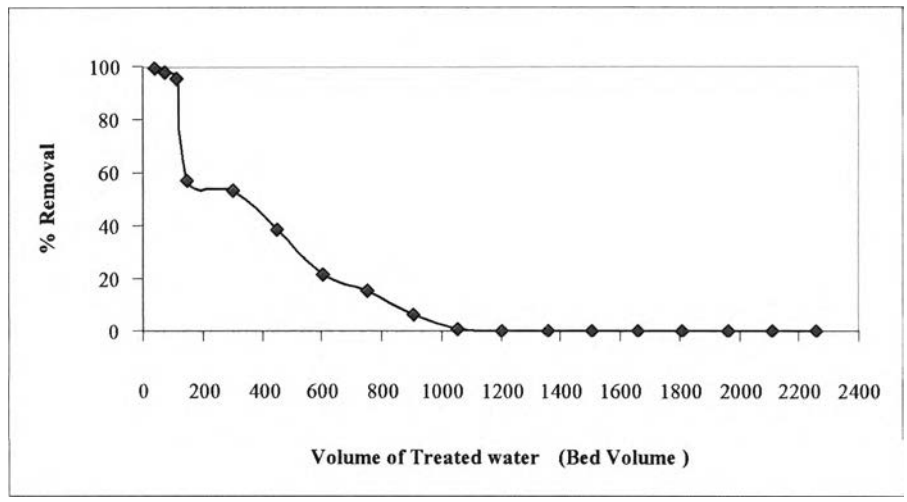
จากผลการใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการดูดติดผิวสีย้อมรีแอกทีฟสีแดง ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์ 0.910 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดติดผิวได้ดังรูปที่ 4.28 จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสีในน้ำตัวอย่าง พบว่าในช่วง 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 6 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 6, 12 และ 18 ชั่วโมง ปริมาณของสีย้อมในน้ำที่ออกจากถังดูด

ติดผิวมีค่าน้อย คือ 0.61, 2.69 และ4.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 113 ปริมาตรเบด ปริมาตรเบดที่ 113 ถึง 151 ความเข้มข้นของสีย้อมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 4.68 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 42.99 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตจากความชันในช่วงดังกล่าว เมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปจนถึงจุดเบรคทรูจ์ที่กำหนดให้มีปริมาณของสีย้อมในน้ำเสีย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้นคือ 302 ปริมาตรเบด และความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น ปริมาณของสีย้อมในน้ำเสียเริ่มคงที่ที่ 1206 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นสีของน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 99.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการกำจัดสีของสารดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด

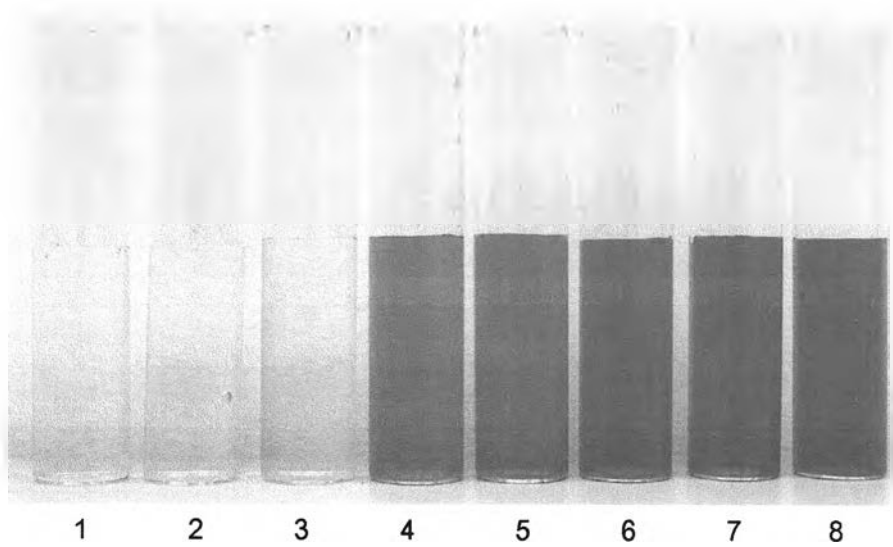


รูปที่ 4.28 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่เวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด ดังรูปที่ 4.29 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีจะลดลงเมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น ที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึง 113 ปริมาตรเบด ประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ย 97.34% ที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 151 ปริมาตรเบด ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 57.01% และประสิทธิภาพลดลงทีละน้อยจนถึงที่ 1206 ปริมาตรเบดที่ประสิทธิภาพการกำจัดคงที่ที่ 0.15% คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดจนถึงจุดเบรคทรูจ์เฉลี่ย 80.48%



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที



รูปที่ 4.30 ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดสีแบบต่อเนื่องที่เวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที

1) 0.61 mg/l. 2) 2.69 mg/l. 3) 4.68 mg/l. 4) 42.60 mg/l.

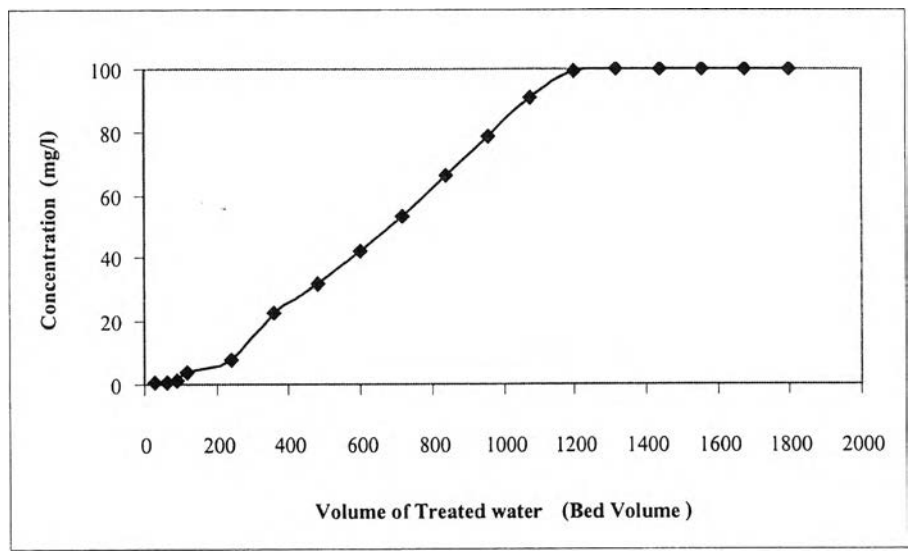
5) 46.66 mg/l. 6) 61.42 mg/l. 7) 78.26 mg/l. 8) 84.93 mg/l.

จากรูปที่ 4.30 แสดงลักษณะสีของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที จะเห็นว่าที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 113 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นสี 0.61, 2.69 และ 4.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะสีน้ำเสียไม่มีสี ใส จากนั้นน้ำที่ผ่านการกำจัดสีจะมีสีเข้มขึ้นชัดเจนที่ความเข้มข้น 42.60 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นสี 46.66 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไปลักษณะสีไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะสีเข้มเหมือนลักษณะสีของน้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการ

ทดลอง เนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งในเรื่องเกี่ยวกับสียังไม่มีค่ามาตรฐานที่ชัดเจน กำหนดแต่เพียงลักษณะของน้ำทิ้งต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดจุดเบรคทรูจ์ที่มีปริมาณของสีย้อมในน้ำเสีย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับที่ชัดเจนในการกำจัดสี

4.4.2 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที

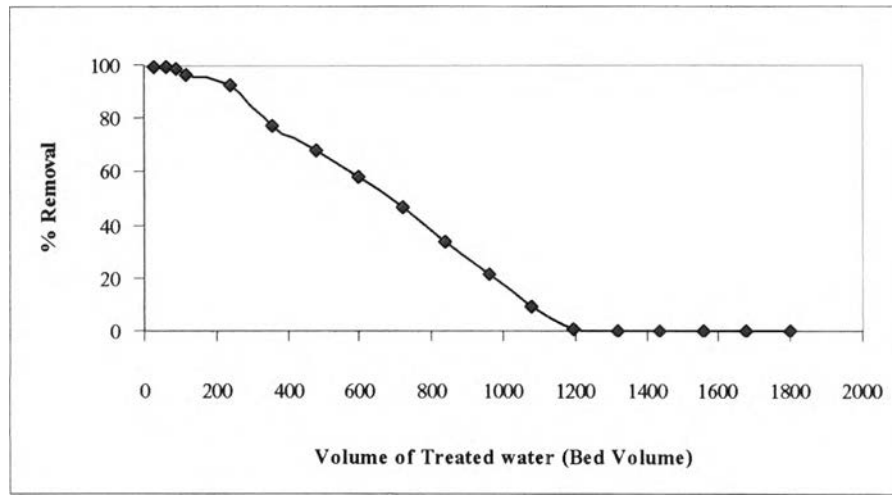
จากผลการใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการดูดติดผิวสีย้อมรีแอกทีฟสีแดง ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์ 0.458 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดติดผิวได้ดังรูปที่ 4.31 โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุก 6 ชั่วโมง สำหรับ 24 ชั่วโมงแรกของการกำจัด ความเข้มข้นของสีที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 30, 60, 90และ 120 ปริมาตรเบด หรือที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 6, 12 และ 18 ชั่วโมง คือ 0.52, 0.60, 1.43 และ 3.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสีจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จนถึงจุดเบรคทรูจ์ที่กำหนดให้ความเข้มข้นของสีประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้น 719 ปริมาตรเบด และที่ 1198 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียมีค่ามากกว่า 99 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสามารถในการกำจัดสีคงที่



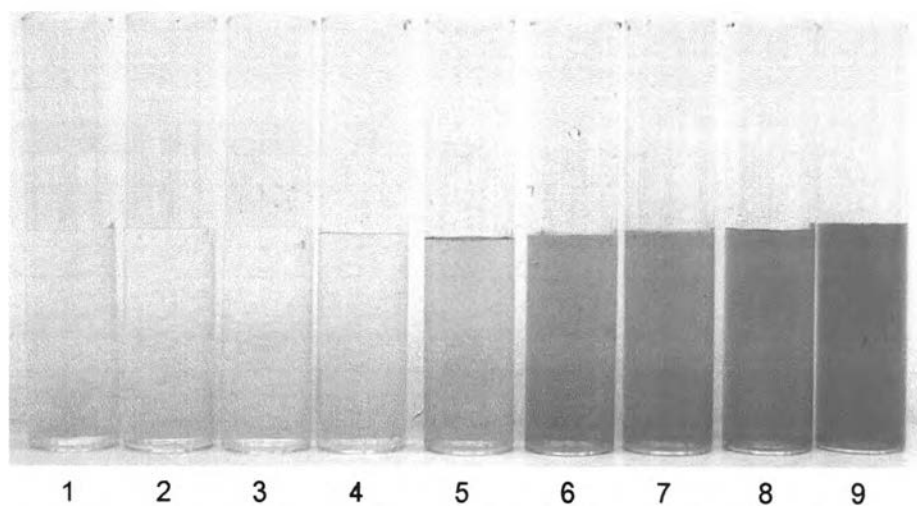
รูปที่ 4.31 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดสีย้อมที่เวลากัก 20นาที

จากรูปที่ 4.32 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีจะลดลง เมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 719 ปริมาตรเบด ประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ย 81.80% ประสิทธิ

ภาพการกำจัดสีลดลงอย่างสม่ำเสมอจนถึง 1198 ปริมาตรเบด ประสิทธิภาพการกำจัดเริ่มคงที่ที่ 0.17% ประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่า 1% ความสามารถในการกำจัดสีคงที่



รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที



รูปที่ 4.33 ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดสีแบบต่อเนื่องที่เวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที

1) 0.52 mg/l. 2) 0.60 mg/l. 3) 1.43 mg/l. 4) 3.66 mg/l. 5) 7.63 mg/l.

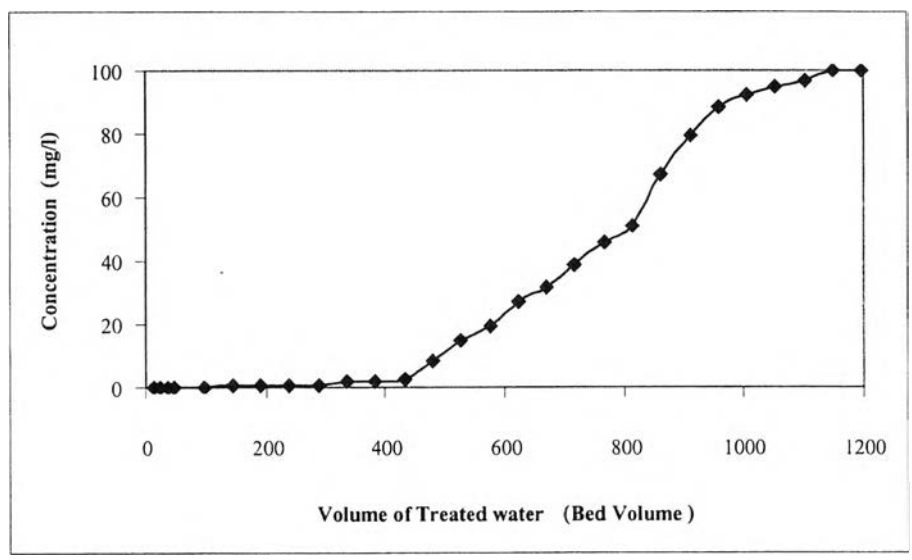
6) 22.69mg/l. 7) 31.80 mg/l 8) 42.24 mg/l. 9) 53.22 mg/l.

เมื่อพิจารณาลักษณะสีของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัด จากรูปที่ 4.33 แสดงลักษณะสีของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที จะเห็นว่าที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 90 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นสี 0.52, 0.60และ 1.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะสีน้ำ

เสียใส ไม่มีสี จากนั้นน้ำที่ผ่านการกำจัดสีเริ่มมีสีตั้งแต่สีชมพูอ่อนที่ความเข้มข้นสี 3.66 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึงที่ความเข้มข้นสี 53.22 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นต้นไปลักษณะสีไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะสีเข้มเหมือนลักษณะสีของน้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง คิดเป็น 719 ปริมาตรเบด

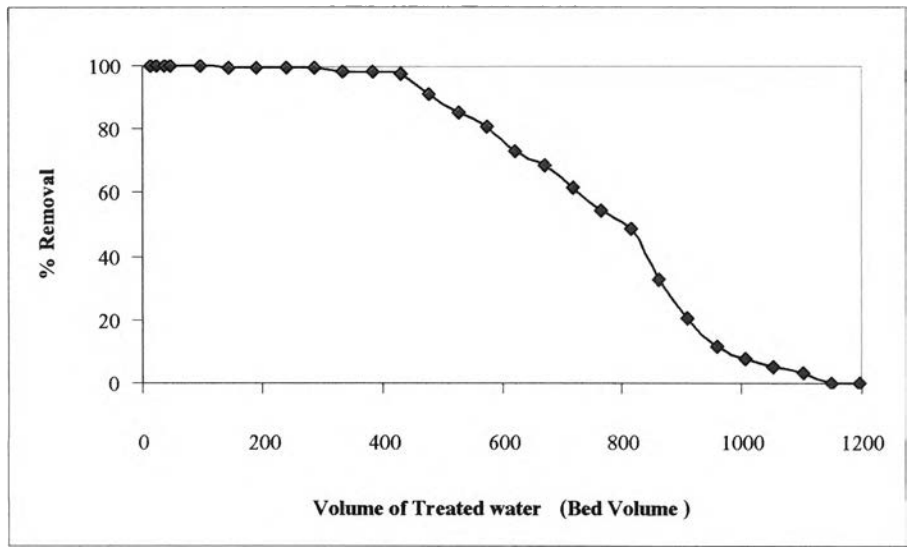
4.4.3 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที

จากผลการใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการดูดติดผิวสีย้อมรีแอกทีฟสีแดง ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์ 0.301 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดติดผิวได้ดังรูปที่ 4.34 พบว่าสำหรับ 24 ชั่วโมงแรกของการกำจัด ความเข้มข้นของสีคือ 0.09, 0.14, 0.14 และ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด12, 24, 36 และ 48 ปริมาตรเบด และตั้งแต่เริ่มการกำจัดจนถึง 287 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดถึงจุดเบรคทรูจ์ของการทดลอง คือ 814 ปริมาตรเบด มีความเข้มข้นสี 51.04 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเส้นกราฟมีความชันสูงขึ้นหมายความว่าความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น และที่ 1150 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นสีคงที่ที่ 99.86 มิลลิกรัมต่อลิตร



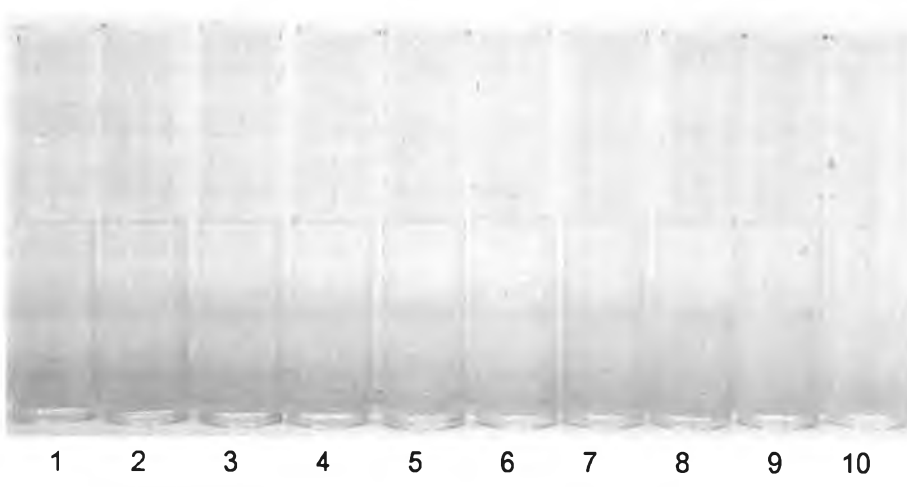
รูปที่ 4.34 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดสีย้อมที่เวลากัก 30 นาที

จากรูปที่ 4.35 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีจะลดลง เมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดประมาณก่อนถึงจุดเบรคทรูจ์ คือ 87.66% ที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 814 ปริมาตรเบด



รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที

เมื่อพิจารณาลักษณะสีของน้ำที่ผ่านการกำจัดแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที จากรูปที่ 4.36 แสดงลักษณะสีของน้ำที่ผ่านการกำจัดตั้งแต่เริ่มการทดลองถึงปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัด 335 ปริมาตรเบด ความเข้มข้นสีอยู่ในช่วง 0.09 – 1.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า สีของน้ำที่ผ่านการกำจัด ใส ไม่มีสี ซึ่งสอดคล้องกับผลความเข้มข้นของสี และประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

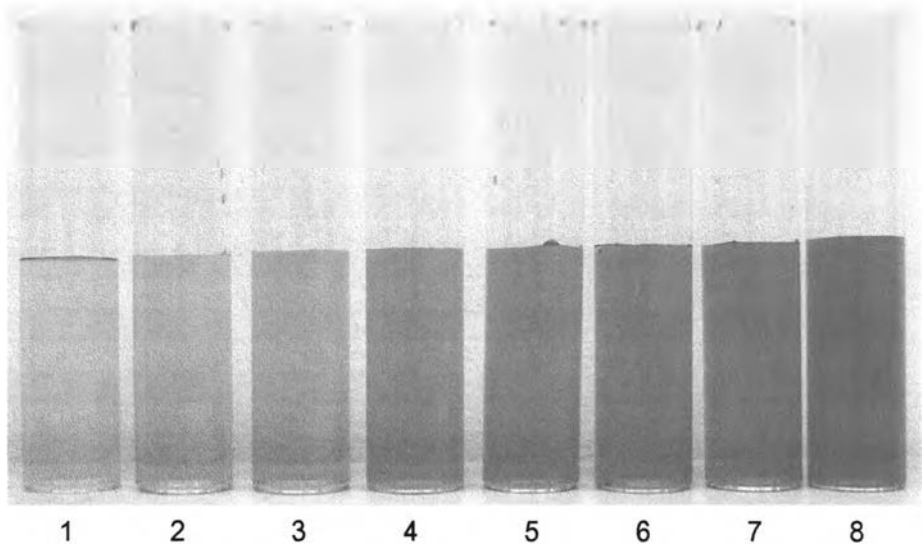


รูปที่ 4.36 ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดสีแบบต่อเนื่องที่เวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที

1) 0.09 mg/l. 2) 0.14 mg/l. 3) 0.14 mg/l. 4) 0.21 mg/l. 5) 0.27 mg/l.

6) 0.52 mg/l. 7) 0.57 mg/l. 8) 0.58 mg/l. 9) 0.87 mg/l. 10) 1.80 mg/l.

รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะสีของน้ำที่ผ่านการกำจัดแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที ตั้งแต่ความเข้มข้นสี 8.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 479 ปริมาตร ซึ่งลักษณะสีเริ่มมีสีชมพูอ่อน และเข้มขึ้นตามความเข้มข้นสีคงเหลือที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นสี 51.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 814 ปริมาตรเบด



รูปที่ 4.37 ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดสีแบบต่อเนื่องที่เวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที

1) 8.68 mg/l. 2) 14.99 mg/l. 3) 19.22 mg/l. 4) 26.88 mg/l.

5) 31.50 mg/l. 6) 38.77 mg/l. 7) 45.79 mg/l. 8) 51.04 mg/l.

จากผลการทดลองการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง สามารถสรุปปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดสีของถังดูดติดผิว ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30, 20 และ 10 นาที ที่ความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือในน้ำเสียประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

Contact Time (min)	**อัตราการไหล** (l/hr)	Volume Treated (l)	Bed Volume	% Removal
10	0.910	46.138	302	80.476
20	0.458	109.944	719	81.799
30	0.301	124.603	814	87.656

จากตารางที่ 4.7 พบว่า ในถังดูดติดผิว A ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที สามารถกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง C.I. Reactive 180 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาตรน้ำที่กำจัดได้ทั้งสิ้น 302 ปริมาตรเบด หรือคิดเป็น 46.14 ลิตร ในถังดูดติดผิว B ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที สามารถกำจัดสีในน้ำเสียที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้น 719 ปริมาตรเบด หรือคิดเป็น 109.94 ลิตร และถังดูดติดผิว C ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที สามารถกำจัดสีในน้ำเสียที่ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้น 814 ปริมาตรเบด หรือคิดเป็น 124.60 ลิตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดติดผิวสีย้อมในถังดูดติดผิวทั้ง 3 อัน พบว่าที่ความเข้มข้นสีคงเหลือในน้ำเสีย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังดูดติดผิว C ที่ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที สามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้มากที่สุดคือ 814 ปริมาตรเบด รองลงมาคือ ถังดูดติดผิว B ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที และ A ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที ที่ 719 และ 302 ปริมาตรเบด ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยจนถึงจุดเบรคทรูจ์ พบว่าถังดูดติดผิว C ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยสูงสุดคือ 87.66% รองลงมาคือถังดูดติดผิว B ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที และ A ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที 81.80% และ 80.48% ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับปริมาตรน้ำที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง ด้วยสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบต่อเนื่อง เนื่องจากถังดูดติดผิว A ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 10 นาที มีอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนสู่คอลัมน์เร็วที่สุด คือ 0.910 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของสีย้อมในน้ำออกมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้นเร็วกว่า ถังดูดติดผิว B ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 20 นาที ซึ่งมีอัตราการไหล 0.458 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ถังดูดติดผิว C ระยะเวลาสัมผัสถังเปล่า 30 นาที มีอัตราการไหลของน้ำเสียช้าที่สุด คือ 0.301 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งทำให้เกิดการสะสมตัวของสีย้อมที่ผ่านชั้นของสารดูดซับทีละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสีย้อมออกมากับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัด ในกรณีนี้สารดูดซับจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

4.5.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิต

ค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง ประกอบด้วยค่าวัตถุดิบ และค่าสารเคมี ดังนี้

1. ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

ในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง วัตถุดิบที่ใช้คือเปลือกมันสำปะหลัง ที่เป็นวัสดุเศษจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยปกติเปลือกมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตส่วนใหญ่โรงงานจะขายให้กับเกษตรกรเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการเพาะเห็ดฟาง ซึ่งราคาของเปลือกมันสำปะหลัง ราคา ตันละ 100 บาท

2. ค่าสารเคมีที่ใช้ในการผลิต

สารเคมีที่ใช้ในการผลิต คือ สารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 85% ซึ่งราคาสารละลายกรดฟอสฟอริกแบบ commercial grade คือ บริษัทขายแบบเหมา 35 กิโลกรัมขึ้นไป ซึ่ง 16 กิโลกรัมมีสารละลายกรดฟอสฟอริก 18 ลิตร ราคาขาย 45 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นราคากรดฟอสฟอริก ลิตรละ 40 บาท

4.5.2 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

จากการศึกษาพบว่าร้อยละของสารดูดซับที่ผลิตได้จากเปลือกมันสำปะหลังคือ 34.18 โดยคิดจากการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง 1000 กรัม ซึ่งในการผลิตสารดูดซับ 1000 กรัม ต้องใช้เปลือกมันสำปะหลัง 2925.68 กรัม เปลือกมันสำปะหลัง ราคาตันละ 100 บาท คิดเป็นราคาเปลือกมันสำปะหลังที่ใช้ประมาณ 0.29 บาท

สารละลายกรดฟอสฟอริกใช้ในอัตราส่วนเปลือกมันสำปะหลังต่อสารละลายกรดฟอสฟอริก 1:2 โดยน้ำหนัก ในการผลิตสารดูดซับ 1000 กรัม คิดเป็นสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ต้องใช้ 2.36 ลิตร คิดเป็นเงิน 94.4 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง 1000 กรัม คือ 0.29+94.4 = 94.69 บาท หรือประมาณ 95 บาทต่อกิโลกรัม