



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการใช้สารดูดซับที่ผลิตขึ้นจากเปลือกมันสำปะหลัง ในการกำจัดทองแดงด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยทำการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังและนำมาทดลองกำจัดทองแดงด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการทดลอง สำหรับการทดลองได้แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง การศึกษาเบื้องต้นในการใช้สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังเพื่อกำจัดทองแดง การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับที่เหมาะสม และการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorptive Column)

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองกับสารดูดซับ 3 แบบ ดังมีรายละเอียดดังนี้

1) สารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกมันสำปะหลังที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมาผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี โดยแช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริก เผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วล้างโดยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) (สารดูดซับแบบที่ 2)

2) สารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 2 แต่ล้างด้วยน้ำร้อน (สารดูดซับแบบที่ 3)

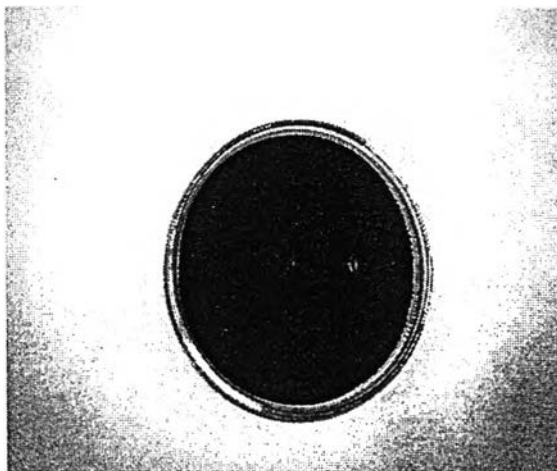
3) ซึ่งการศึกษานี้จะทำการทดลองเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ขายเป็นการค้า (ถ่านกัมมันต์แบบที่ 1)

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี

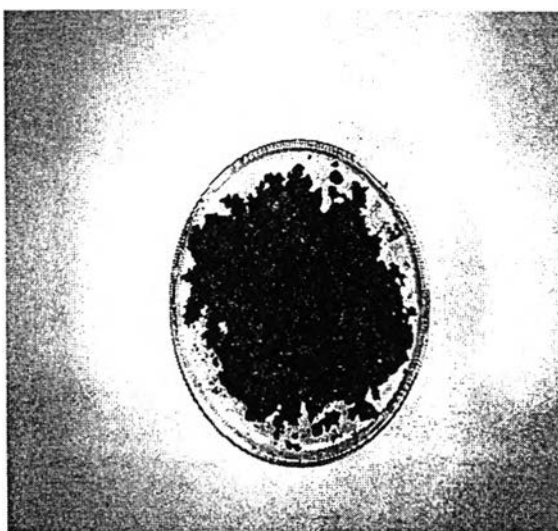
โดยใช้สัดส่วนเปลือกมันสำปะหลังต่อกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก และล้างด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนเปลือกมันสำปะหลังต่อโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ดังแสดงภาพถ่ายของเปลือก

มันสำปะหลังที่แช่ด้วยกรดฟอสฟอริก สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 คุณสมบัติของสารดูดซับ และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) ของสารดูดซับ ทั้ง 3 แบบ ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของสารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 2
(ล้างด้วยไซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต)

ลักษณะโดยทั่วไปของสารดูดซับ มีลักษณะแตกต่างกับเปลือกมันสำปะหลังก่อนการทดลองสารดูดซับที่ได้มีสีดำมีขนาดเล็กลง มีความแข็ง แต่เปราะบาง มีลักษณะคล้ายถ่านทั่วไป นำมาบดละเอียดได้ง่าย



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของสารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 3
(ล้างด้วยน้ำร้อน)

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง
กับถ่านกัมมันต์ที่ขายเป็นการค้า (แบบที่ 1)

ลักษณะสมบัติ	ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1	สารดูดซับ แบบที่ 2	สารดูดซับ แบบที่ 3	ค่า*** มาตรฐาน	ค่า ทั่วไป
วัสดุ	ถ่านบิพูมินัส*	ถ่านจาก เปลือกมัน สำปะหลัง	ถ่านจาก เปลือกมัน สำปะหลัง		
ร้อยละปริมาณเก่า	8.00 [°]	4.80 [°]	5.10 [°]	-	<10
ร้อยละสารดูดซับ ที่ผลิตได้	-	35.04	34.62	-	-
ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	900	460	473	600	-
พื้นที่ผิวด้วยวิธี BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	1,005.31	889.48	734.61	-	500-1,400
ปริมาตรโพรง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.6001	0.6044	0.4964	-	-
ขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม)	23.88	27.18	27.03	-	20-20,000
ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	18.08	14.33	19.63	-	-

หมายเหตุ : * ที่มา Faust และ Aly (1987)

** ที่มา กิรณา ชินสุวรรณโสภณ (2547)

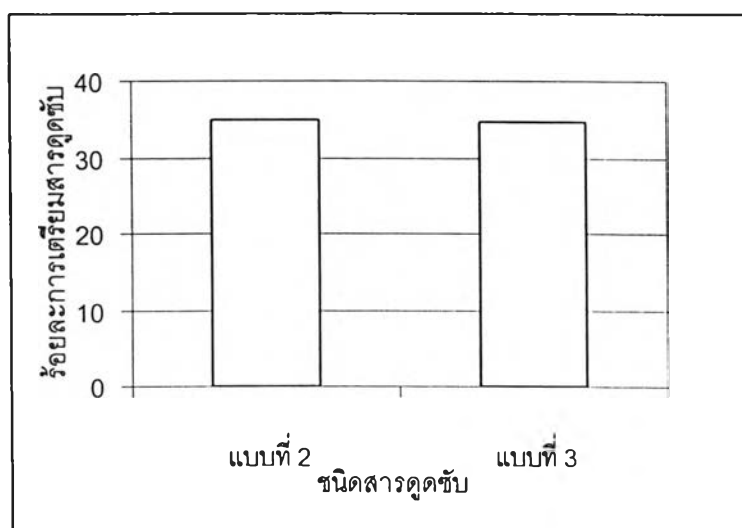
*** ที่มา มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ (2532)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเก่าของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 และสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีค่าค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 8, 4.8 และ 5.1 ตามลำดับ ซึ่งการหาปริมาณเก่า เป็นการหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูง และปนเปื้อนอยู่ในถ่านเก่าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลง เนื่องจากมีเก่าอุดตันอยู่ในรูพรุน สำหรับสารดูดซับนั้นถ้ามีปริมาณเก่าสูงจะมีราคาต่ำลง เพราะน้ำหนักของสารดูดซับที่ขายเป็นการค้านั้นมิใช่น้ำหนักจริง แต่มีน้ำหนักของเก่าผสมอยู่ด้วย โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเก่าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ

เก่าของเปลือกมันสำปะหลังกับวัสดุชนิดอื่นที่ได้ มีการนำมาผลิตสารดูดซับ เช่น กะลามะพร้าว ร้อยละ 9.5 และ ไม้ยูคาลิปตัสร้อยละ 6.4 พบว่า ถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 มีปริมาณเด้าน้อยกว่า สารดูดซับจากกะลามะพร้าว สำหรับสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีปริมาณเด้าน้อยกว่าสารดูดซับ จากไม้ยูคาลิปตัส และกะลามะพร้าว เพราะสารดูดซับ ทั้ง 2 แบบ ดังกล่าว ผ่านการกระตุ้นทาง เคมี ด้วยกรดฟอสฟอริกซึ่งกรดฟอสฟอริกจะช่วยล้างเด้าออกได้ ช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น (กีรณา ชินสุวรรณโสภณ, 2547)

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ พื้นที่ผิว BET ปริมาตรจำเพาะของโพรง และค่า ขนาดโพรงเฉลี่ย กับงานวิจัยนี้ พบว่าสารดูดซับ แบบที่ 3 ดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 พบว่างานวิจัยนี้ มีค่าพื้นที่ผิว BET น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 แต่มี พื้นที่ผิว BET มากกว่าสารดูดซับ แบบที่ 3 แต่ขนาดโพรงเฉลี่ย และปริมาตรโพรงมีค่ามากกว่า ถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 และ สารดูดซับ แบบที่ 3

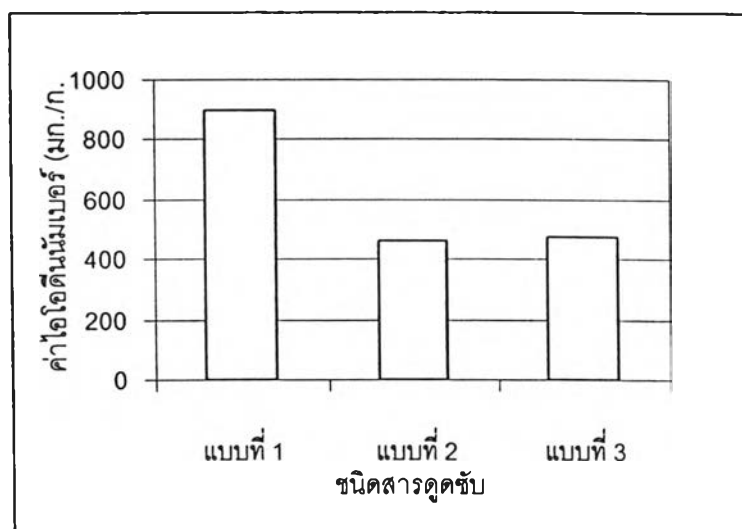
ค่าปริมาณสารดูดซับ หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากผลการเตรียมสารดูดซับพบว่าน้ำหนักของ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดน้อยลงไป ปริมาณร้อยละของสารดูดซับ ที่ผลิตได้ 2 แบบ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็น ได้ว่าสารดูดซับ แบบที่ 2 ร้อยละ 35.04 และ สารดูดซับ แบบที่ 3 มีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่า ต่ำกว่าเล็กน้อย คือ ร้อยละ 34.62



รูปที่ 4.3 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีการเตรียมสารดูดซับ 2 แบบ

สำหรับกระบวนการผลิตสารดูดซับของงานวิจัยนี้ ใช้สารเคมีคือกรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นให้เปลือกมันสำปะหลังมีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้เพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว เนื่องจากสารละลายกรดสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้เอง และกรดฟอสฟอริกยังมีความสามารถในการดูดความชื้นอันเป็นการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนไอออนได้อีกทางหนึ่งด้วย

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 พบว่าเปลือกมันสำปะหลังเมื่อนำมาเผาให้เป็นสารดูดซับ โดยผ่านขั้นตอนการกระตุ้นโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกต่อเปลือกมันสำปะหลัง โดยน้ำหนักในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 สารดูดซับที่ผลิตได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงขึ้นเป็น 460 และ 473 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าสารดูดซับ ที่ขายเป็นการค้า เนื่องจากมีการผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 900 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.4 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับ 3 แบบ จากกรรมวิธีการเตรียมสารดูดซับ

ในการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายกรด จำเป็นต้องล้างสารละลายกรดที่ใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นออก งานวิจัยนี้จึงเตรียมสารดูดซับ ที่มีขั้นตอนการเตรียมโดยล้างสารเคมีออกต่างกัน 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่ง การแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อล้างสารละลายกรดฟอสฟอริกที่เหลือซึ่งในที่นี้เรียกว่า เป็นสารดูดซับแบบที่ 2 และวิธีที่สอง การล้างสารดูดซับด้วยน้ำร้อนซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มานานในที่นี้เรียกว่าสารดูดซับแบบที่ 3 พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับแบบที่ 3 คือ 473 มิลลิกรัมต่อกรัม ใกล้เคียงกับสารดูดซับ แบบที่ 2 คือ 460 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากการเตรียมสารดูดซับแบบที่ 2 นำสารดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก นำไปเผาที่ 350 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นแล้วนำถ่านกัมมันต์ ดังกล่าว ไปแช่ใน

สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง และวัดค่าพีเอชจนกว่าพีเอชเป็นกลาง หลังจากนั้นนำไปกรอง แล้วนำไปอบให้แห้ง บด และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ได้สารดูดซับที่เตรียมได้ตามที่ต้องการ ซึ่งต่างจากสารดูดซับแบบที่ 3 ที่ล้างด้วยน้ำร้อน และล้างหลาย ๆ ครั้ง จนกว่าพีเอชเป็นกลางเพื่อทำให้สารที่ตกค้างอยู่อกจากรูพรุน หากค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงแสดงว่ามีรูพรุนขนาดเล็กมากกว่า ดังนั้นสารดูดซับแบบที่ 3 มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ใกล้เคียงกับสารดูดซับแบบที่ 2 แสดงว่าสารดูดซับแบบที่ 3 จึงมีรูพรุนขนาดเล็กกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นคุณสมบัติประการหนึ่งของสารดูดซับที่ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของสารดูดซับในการดูดติดผิวสารที่มีโมเลกุลต่ำซึ่งระบุอยู่บนมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสารดูดซับ (มอก.900-2532) ที่กำหนดให้สารดูดซับมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 เมื่อพิจารณาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังพบว่าถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 ที่ขายเป็นการค้าผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวสารดูดซับที่ได้จึงมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ มีค่าเท่ากับ 900 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีคือกรดฟอสฟอริก ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์น้อยกว่าสารดูดซับและเมื่อนำค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมาเปรียบเทียบกับถ่านที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของสารดูดซับ จากเปลือกมันสำปะหลังกับสารดูดซับชนิดต่าง ๆ

วัตถุดิบ	สารเคมีที่ใช้	อุณหภูมิ (°ซ)	ไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก.)	อ้างอิง
เปลือกมันสำปะหลัง	กรดฟอสฟอริก	350	460-473	ผู้วิจัย
เปลือกทุเรียนและเปลือกมะม่วงหิมพานต์	เกลือแกง	800	567 และ 532	ลลิตา นิต์ศนจากรกุล (2544)
ซังข้าวโพด	ซิงค์คลอไรด์	400-800	800-1075	พงศธร โค้วชชาภรณ์ (2538)
กะลามะพร้าว	ซิงค์คลอไรด์	500	898	กฤติยา เสือสีนาค (2542)

สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350°C มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ต่ำกว่าสารดูดซับที่เตรียมจากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด นั่นคือ กะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ สารดูดซับเปลือกทุเรียนและเปลือกมะม่วงหิมพานต์ ที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง และซังข้าวโพดที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ เนื่องจากสภาวะการเตรียม เปลือกมันสำปะหลังใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า และทำการกระตุ้นและเผาในขั้นตอนเดียวกัน

4.1.2 การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope)

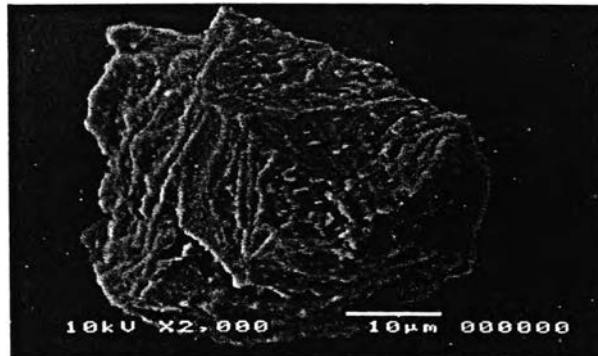
การศึกษานั้นได้ใช้สารดูดซับทั้ง 3 แบบมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 325 ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้ในการทดลองแบบแบตช์ (Batch) (ตามมาตรฐาน ASTM D3860-89a, 1996) ดังภาคผนวก ฅ ศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 2,000-3,500 เท่า

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่เตรียมจากกรรมวิธีต่าง ๆ กัน ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน สามารถทำให้ทราบรายละเอียดของพื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับ และช่วยในการสนับสนุนการวิเคราะห์และวิจารณ์ เช่น มีจำนวนรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้น รูพรุนมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น เป็นต้น ดังรูปที่ 4.5-4.7

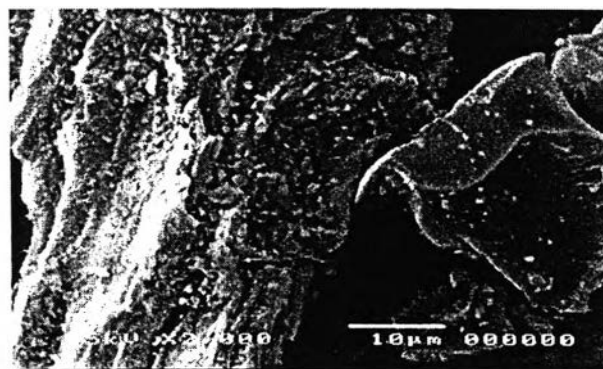
รูปที่ 4.5 เป็นภาพถ่ายของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ที่ใช้กำลังขยาย 3,500 เท่า เนื่องจากรายละเอียดของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ดังกล่าว ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ไม่ชัดเจน พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 มีลักษณะมีรูพรุน รูปที่ 4.6 เป็นภาพถ่ายของสารดูดซับแบบที่ 2 ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกและล้างกรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ลักษณะพื้นที่ผิวมีความขรุขระ และรูปที่ 4.7 เป็นภาพถ่ายสารดูดซับแบบที่ 3 ล้างสารละลายด้วยน้ำร้อน ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่าพื้นที่ผิวมีความขรุขระ



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1



รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ แบบที่ 3

4.1.3 การวิเคราะห์สารดูดซับแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

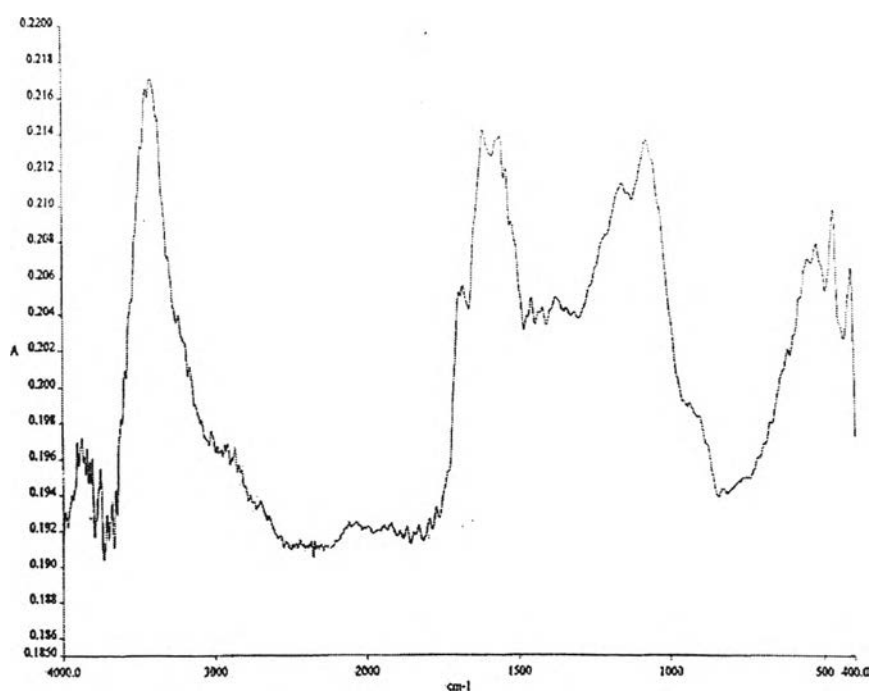
จากเส้นกราฟของสารดูดซับแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีลักษณะมีจุดยอด(Peak) ของกราฟแต่ละกราฟทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) ได้ วิเคราะห์ได้ว่าในสารดูดซับแบบที่ 2 พบหมู่ฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) ของ Hydroxy, Amino Compound, Hydrated Metal Salt และ Oxide ดังนี้

หมู่ O-H หรือ N-H	ที่ช่วงความถี่	3,400-2,000	cm ⁻¹
หมู่ Si ₂ NH	ที่ช่วงความถี่	~3,400	cm ⁻¹
หมู่ P-OH	ที่ช่วงความถี่	1,740-1,600	cm ⁻¹
หมู่ P-S	ที่ช่วงความถี่	<600	cm ⁻¹
หมู่ P-O	ที่ช่วงความถี่	1,260-855	cm ⁻¹
หมู่ NH ³⁺	ที่ช่วงความถี่	1,660-1,480	cm ⁻¹
หมู่ P=N-ar	ที่ช่วงความถี่	1,390-1,300	cm ⁻¹
หมู่ N-H	ที่ช่วงความถี่	1,550-1480	cm ⁻¹

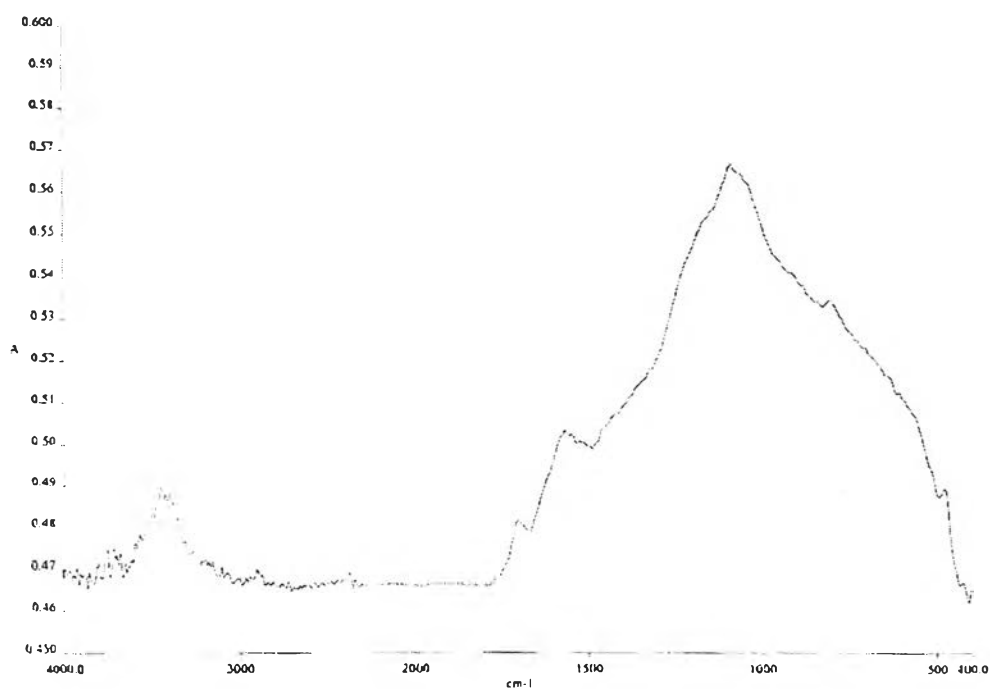
ซึ่งได้มาจากสารดูดซับแบบที่ 2 เพราะจากการหาค่าประกอบของสารดูดซับแบบที่ 2 พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปดังกล่าว เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งหมู่ Functional group ของ Phosphate, Hydrated Metal Salt และ Silicate พบเป็นส่วนใหญ่

จากรูปที่ 4.9 จากเส้นกราฟของสารดูดซับแบบที่ 3 ซึ่งมีลักษณะมีจุดยอด (Peak) ของแต่ละกราฟอยู่ไม่กี่ค่า ทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) ได้น้อย วิเคราะห์ได้ว่า พบว่าในสารดูดซับแบบที่ 3 พบหมู่ Functional Group ของ OH⁻ (Hydroxy) , Amino Compound, Phosphate และ Silicate ดังนี้

หมู่ P-OH หรือ P-O	ที่ช่วงความถี่	1,260-855	cm ⁻¹
หมู่ Si-O-C	ที่ช่วงความถี่	850-800	cm ⁻¹
หมู่ Si-O	ที่ช่วงความถี่	1,100-1,000	cm ⁻¹
หมู่ Si-C	ที่ช่วงความถี่	< 625	cm ⁻¹
หมู่ P-S	ที่ช่วงความถี่	<600	cm ⁻¹
หมู่ P-OH	ที่ช่วงความถี่	1,740-1,600	cm ⁻¹
หมู่ N-H	ที่ช่วงความถี่	1,650-1,500	cm ⁻¹



รูปที่ 4.8 ค่า A(Absorbance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของสารดูดซับจาก
เปลือกมันสำปะหลัง แบบที่ 2



รูปที่ 4.9 ค่า A (Absorbance) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของสารดูดซับจาก
เปลือกมันสำปะหลัง แบบที่ 3

4.1.4 การวิเคราะห์สารดูดซับ แบบที่ 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

จากการวิเคราะห์สารดูดซับ แบบที่ 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น PW 2400 ได้ผลดังตารางที่ 4.3 พบว่าสารดูดซับ แบบที่ 2 มีธาตุต่าง ๆ ดังนี้ Si, Al, Fe, K, Ca, Mg, Na, Mn, S, P, Ti, Ni, Zn, Cu และ Fe

ตารางที่ 4.3 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารดูดซับ แบบที่ 2 ที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

Compounds	Concentration(%)	Compounds	Concentration(%)
P ₂ O ₅	49.455	TiO ₂	0.068
Na ₂ O	25.678	SO ₃	0.067
SiO ₂	22.04	ZrO ₂	0.034
Al ₂ O ₃	0.933	MnO ₂	0.015
K ₂ O	0.720	NiO	0.012
CaO	0.568	CuO	0.010
Fe ₂ O ₃	0.304	ZnO	0.009
MgO	0.086	-	-

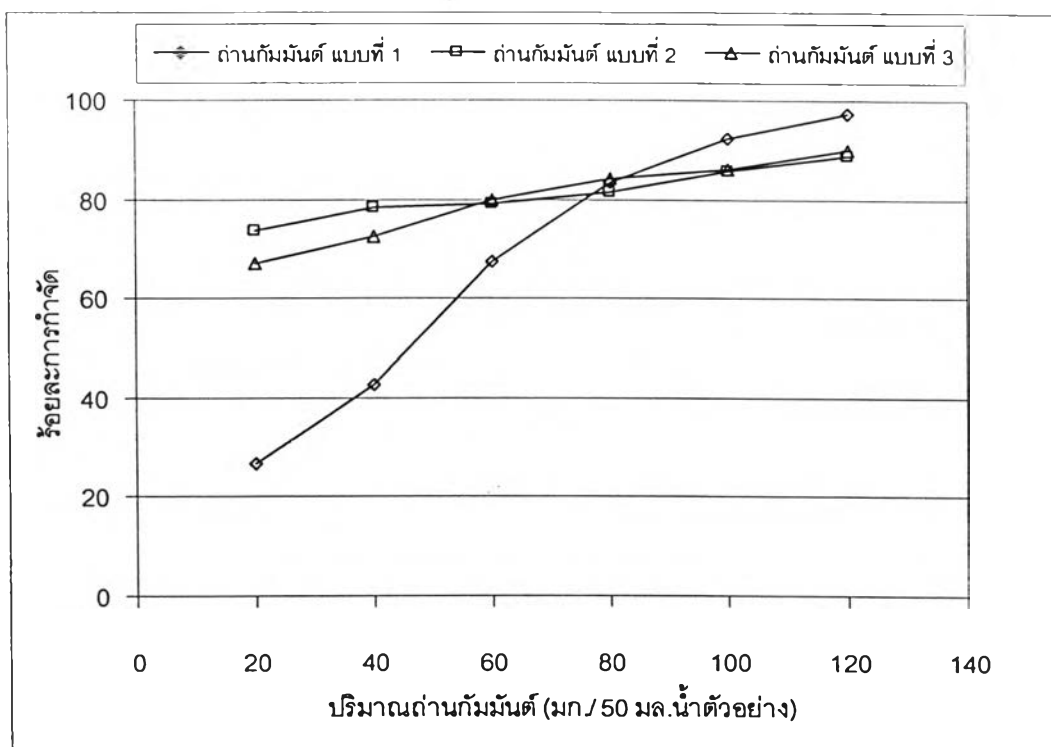
4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง เพื่อกำจัดทองแดง

การทดลองนี้เป็นการทดลองนำสารดูดซับ ที่เตรียมขึ้นทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบกับแบบที่ 1 มาทดสอบความเป็นไปได้ในการนำสารดูดซับมากำจัดทองแดง ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบแบตช์ (Batch) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และใส่สารดูดซับ ที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน 6 ค่า คือ 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ทั้ง 3 แบบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาวัดพีเอช และหาความเข้มข้นทองแดงที่เหลือโดยทดสอบด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer กับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเป็นไปได้ และแนวโน้มการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ 3 แบบ ที่ความเข้มข้นของทองแดง เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

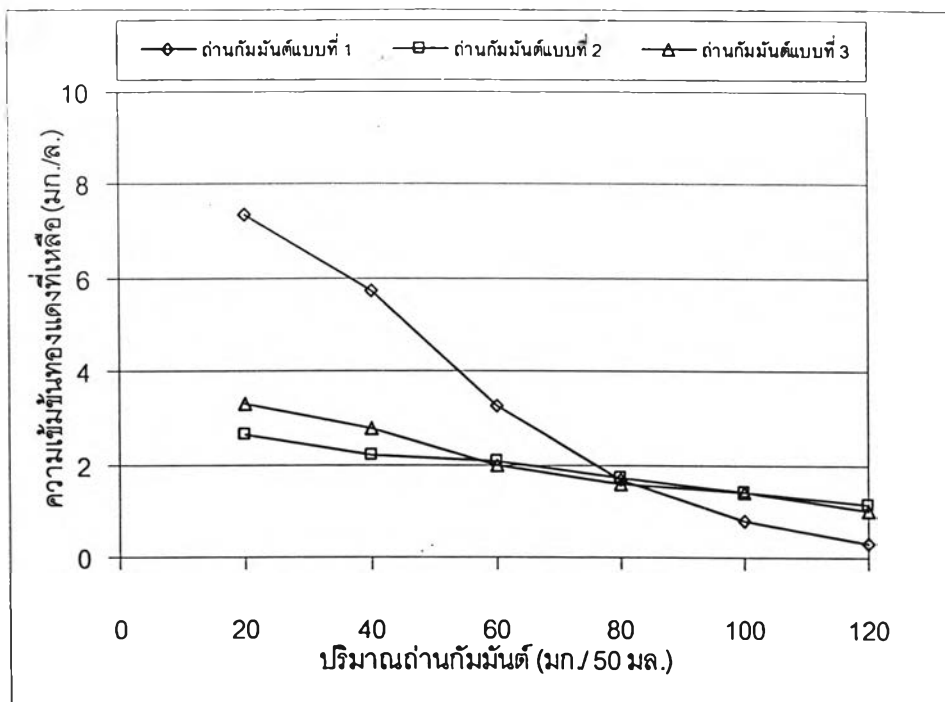
ปริมาณ สารดูดซับ (มก./ 50 มล. น้ำตัวอย่าง)	สารดูดซับแบบที่ 1		สารดูดซับแบบที่ 2		สารดูดซับแบบที่ 3	
	ความ เข้มข้น ทองแดง ที่เหลือ (มก./ล.)	ร้อยละ การกำจัด	ความ เข้มข้น ทองแดง ที่เหลือ (มก./ล.)	ร้อยละ การกำจัด	ความ เข้มข้น ทองแดงที่ เหลือ (มก./ล.)	ร้อยละ การกำจัด
20	7.34	26.60	2.64	73.65	3.29	67.10
40	5.74	42.57	2.18	78.19	2.76	72.41
60	3.24	67.62	2.09	79.09	2.00	79.96
80	1.67	83.32	1.87	81.28	1.60	84.05
100	0.78	92.19	1.42	85.82	1.40	86.01
120	0.29	97.10	1.13	88.75	1.01	89.88

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ 3 แบบ ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้น มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ ทั้ง 3 แบบ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณสารดูดซับ 120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ทั้ง 3 แบบ แต่ถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงสุดร้อยละ 97.1 ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจน จากประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีค่าร้อยละ 88.75 และร้อยละ 89.88 เนื่องจากถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 และ แบบที่ 3 และเมื่อพิจารณาในช่วงความเข้มข้นของสารดูดซับ 20-120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง เส้นกราฟของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 มีความชันมากกว่า คือมีแนวโน้มการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26.60 เป็นร้อยละ 97.10 ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับแบบที่ 2 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 73.65 เป็นร้อยละ 88.75 และสารดูดซับ แบบที่ 3 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 67.10 เป็นร้อยละ 89.88



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ของสารดูดซับ 3 แบบ

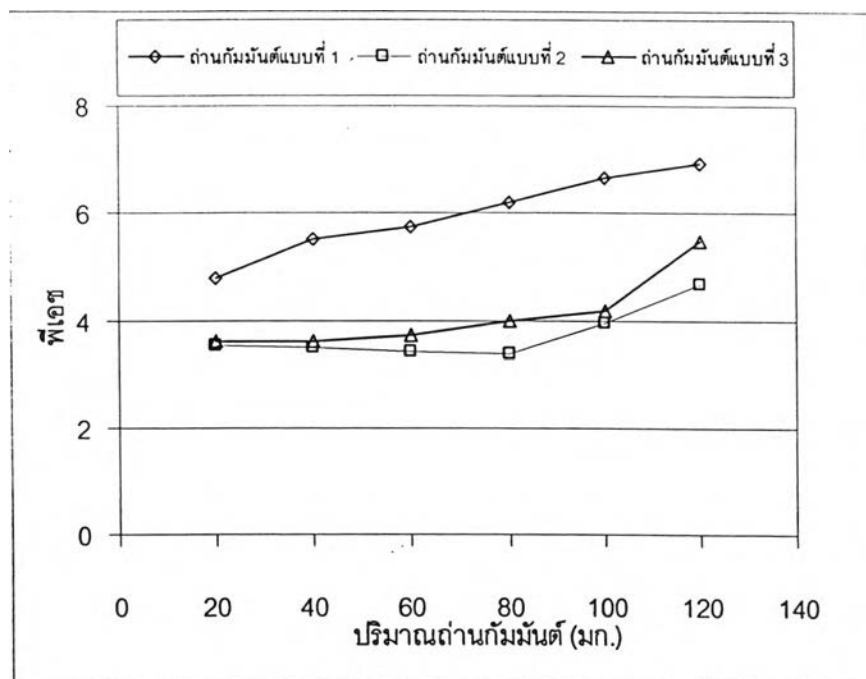
เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงที่คงเหลือในน้ำเสียจากกราฟ ดังรูปที่ 4.11 ความเข้มข้นทองแดงของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1 ลดลงจากเดิมเล็กน้อย สืบเนื่องจากลักษณะกราฟที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง ความเข้มข้นของทองแดงจากเดิม 7.34 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ สารดูดซับ ปริมาณมากที่สุด คือ 120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นทองแดงคงเหลือต่ำสุด 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร สารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการดูดติดผิว้นน้อยกว่า พบว่าความเข้มข้นของทองแดงคงเหลือต่ำสุด ที่ปริมาณสารดูดซับ 120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตร คือ 1.13 และ 1.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามสารดูดซับแบบที่ 2 และ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อ ลิตร) เมื่อใช้สารดูดซับเพียง 80 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตร เท่านั้น ซึ่งเป็นความเข้มข้นเดียวกับกับ สารดูดซับเพียง 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ขายเป็นการค้า (ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1)



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของแดงในน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดด้วยสารดูดซับ 3 แบบ

เมื่อพิจารณาถึงค่าพีเอชของน้ำเสียภายหลังการทดลองที่ยังไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งน้ำเสียก่อนการทดลองมีพีเอชอยู่ที่ 2.60-2.90 พบว่าถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ภายหลังการทดลอง มีค่าพีเอชน้ำเสีย 4.77-6.91 สารดูดซับแบบที่ 2 มีค่าพีเอช 3.35-5.34 สารดูดซับแบบที่ 3 ภายหลังการทดลองมีค่าพีเอชน้ำเสีย 3.58-5.46 ตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว ซึ่งพีเอชของน้ำเสียปรับสภาพด้วยการเติมบัฟเฟอร์ คือ โซเดียมอะซิเตด (CH_3COONa)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดติดผิวของไอออนอื่น ๆ มีผลมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้ พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดติดผิว โดยทั่วไปแล้วการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง สารดูดซับแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแดง ได้ดีขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 พีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยสารดูดซับ 3 แบบ

เนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งในเรือของทองแดงมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจากการทดลองเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียหลังการกำจัดด้วยการดูดติดผิวให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จากผลการศึกษาการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง และการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังในการกำจัดทองแดง เมื่อพิจารณาถึงชนิดของสารดูดซับที่สามารถกำจัดทองแดงได้ดีที่สุด พบว่าสารดูดซับแบบที่ 3 ประสิทธิภาพดีกว่าสารดูดซับแบบที่ 2 เล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาวิธีการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และแช่ด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (สารดูดซับแบบที่ 2) และล้างด้วยน้ำร้อน (สารดูดซับแบบที่ 3) พบว่าการล้างด้วยน้ำร้อนเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาและน้ำร้อนในการล้างกรดจากสารดูดซับนานมาก ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าลักษณะสมบัติ และประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับทั้ง 2 แบบ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน การเตรียมสารดูดซับแบบที่ 3 มีความยุ่งยากมากและได้ผลผลิตต่ำกว่าแบบที่ 2 ดังนั้นจึงเลือกใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 2 เพื่อใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดผิว โดยการหาไอโซเทอมของการดูดติดผิว และการทดลองแบบต่อเนื่องต่อไป เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมสารดูดซับแบบที่ 2 พบว่าร้อยละของสารดูดซับ ที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าสารดูดซับแบบที่ 3 เท่ากับ ร้อยละ 7 สำหรับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2 มีค่ามากกว่าสารดูดซับ แบบที่ 3 เท่ากับ 154.87 ตารางเมตรต่อกรัม ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารดูดซับ

รายละเอียดของสารดูดซับ	สารดูดซับ แบบที่ 2 (แช่ด้วย NaHCO_3)	สารดูดซับ แบบที่ 3 (ล้างด้วยน้ำร้อน)
พื้นที่ผิว(ตารางเมตรต่อกรัม)	889.48	734.61
ปริมาตรโพรง(ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.6044	0.4964
ร้อยละการกำจัดสูงสุด	88.75	89.88

4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ แบบที่ 2 โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

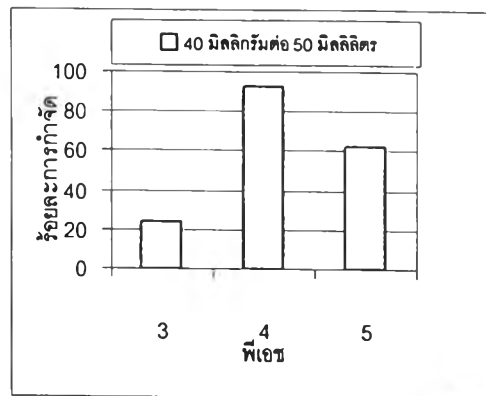
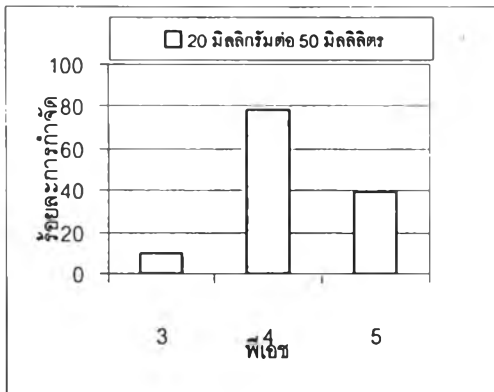
4.3.1 การทดสอบหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับทองแดง

การทดสอบเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ แบบที่ 2 โดยพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.03 ในการทดลองทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า คือ พีเอช 3, 4 และ 5 ใช้ปริมาณสารดูดซับ 20-120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชก่อนและหลังการเติมสารดูดซับ พบว่าค่าพีเอชหลังการเติมสารดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง คือ ค่าพีเอช เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากก่อนเติมสารดูดซับ

ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวทองแดงนั้นเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งในกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว จะทำให้เกิดกลุ่มฟังก์ชันนอล (Functional Group) หลายชนิดที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของคาร์บอน วิธีที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของคาร์บอนที่ใช้วิธีกระตุ้น และออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่างกันนี้ จะใช้คุณสมบัติของกรดและเบสของตัวคาร์บอนเป็นตัวกำหนด คาร์บอนที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอุณหภูมิต่ำจะใช้จะน้อยกว่า 400°C ซึ่งจะดูดติดผิวของไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบแอล (L-type Carbon) ส่วนคาร์บอนที่กระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นมากกว่า 750°C และดูดติดผิวของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบเอช (H-type Carbon) จากการทดลองพบว่าพีเอชของสารละลายหลังจากใส่สารดูดซับปริมาณต่าง ๆ ลงไปมีค่าพีเอชลดลง สารดูดซับชนิดนี้น่าจะมีคุณสมบัติเป็น คาร์บอนแบบแอล (L-type Carbon) แสดงผลของพีเอชที่มีต่อร้อยละการดูดติดผิวทองแดงของสารดูดซับ ในปริมาณต่าง ๆ จากความชันของกราฟ ซึ่งมีความชัดเจนในช่วง

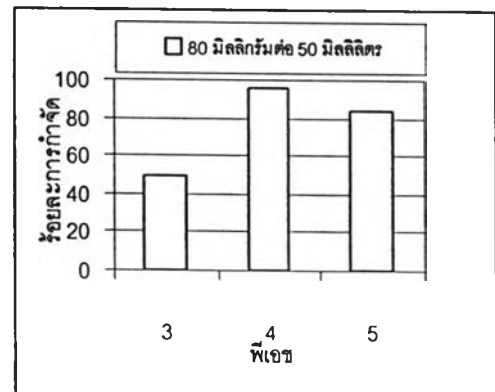
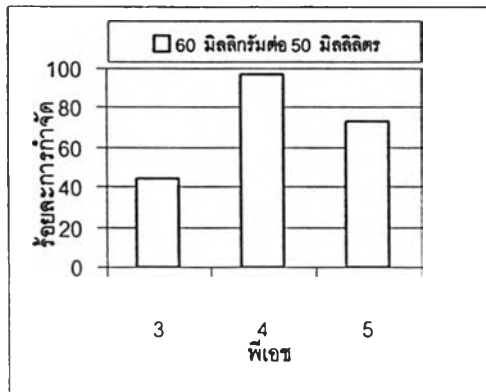
พีเอช 3 เพิ่มเป็นพีเอช 5 ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่น ๆ ที่ค่าลดลงน้อยกว่า โดยสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟในรูป และที่พีเอช 3, 4 และ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงทุกปริมาณมีค่าลดลงเล็กน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่พีเอช 4 ประสิทธิภาพสูงกว่าที่ค่าพีเอชอื่น ๆ สำหรับสารดูดซับทุกปริมาณ และการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากที่ปริมาณสารดูดซับ 40 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างจากผลการทดลอง เมื่อนำปริมาณของทองแดงที่ถูกกำจัดไปต่อปริมาณสารดูดซับที่ใช้ในการดูดซับมาเขียนกราฟแสดงประสิทธิภาพของการดูดติดผิวทองแดงที่พีเอชต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.13 พบว่าปริมาณสารดูดซับ 80 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิว คือ ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวต่ำลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น แต่ที่ปริมาณสารดูดซับ 20 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิวน้อยมาก และที่ปริมาณสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวเพิ่มมากขึ้นตาม เนื่องจากสารดูดซับเริ่มอิ่มตัวกับปริมาณของทองแดงที่ถูกกำจัดไป ปริมาณทองแดงที่ถูกกำจัดมีสัดส่วนน้อยกว่าปริมาณสารดูดซับที่ใส่ลงไปมาก ดังนั้นเมื่อใส่สารดูดซับเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของการดูดติดผิวทองแดงลดลง

จากผลการทดลอง เมื่อนำค่าปริมาณทองแดงที่ถูกกำจัด และค่าพีเอช 3, 4 และ 5 ที่ใช้ในการดูดซับมาเขียนกราฟแสดงร้อยละของปริมาณทองแดงที่ถูกกำจัดกับค่าพีเอชต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.13 พบว่า ที่พีเอช 4 มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงสุด คือ ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวต่ำลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น แต่ที่พีเอช 3 มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิวมีค่าน้อย หากสารดูดซับเริ่มอิ่มตัวกับปริมาณของทองแดงที่ถูกกำจัดไป ปริมาณทองแดงที่ถูกกำจัดมีสัดส่วนน้อยกว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใส่ลงไปมาก ดังนั้นเมื่อใส่สารดูดซับเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของการดูดติดผิวทองแดงลดลง



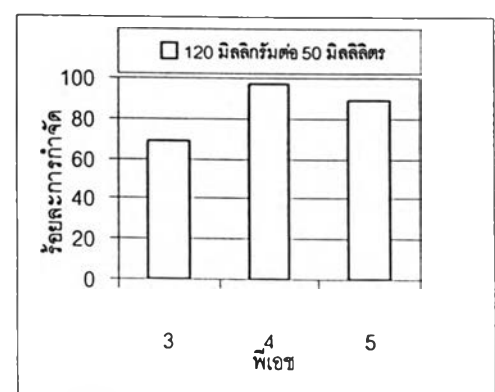
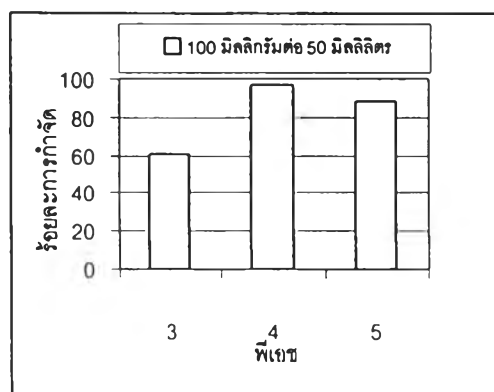
ก) ปริมาณสารดูดซับ 20 มิลลิกรัม

ข) ปริมาณสารดูดซับ 40 มิลลิกรัม



ค) ปริมาณสารดูดซับ 60 มิลลิกรัม

ง) ปริมาณสารดูดซับ 80 มิลลิกรัม

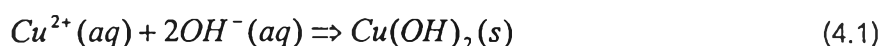


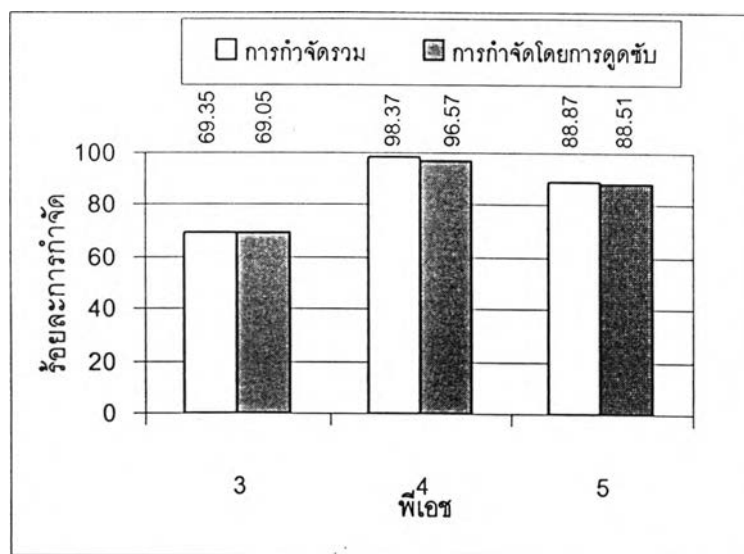
จ) ปริมาณสารดูดซับ 100 มิลลิกรัม

ฉ) ปริมาณสารดูดซับ 120 มิลลิกรัม

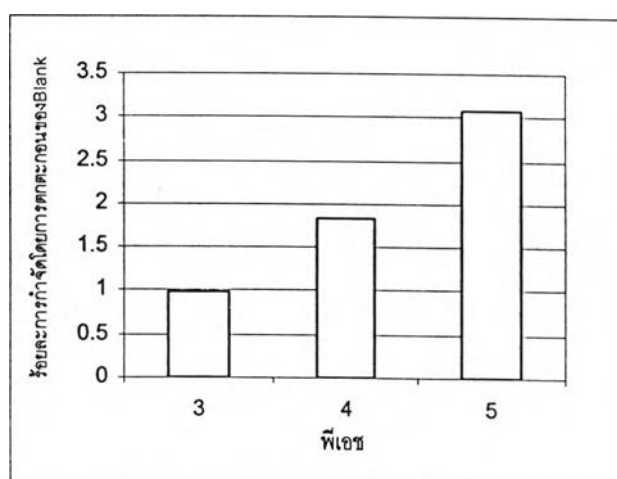
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของน้ำเสียทองแดงสังเคราะห์
ด้วยสารดูดซับ ปริมาณต่าง ๆ ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 3, 4 และ 5

จากการทดลองพบว่าสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพการกำจัดรวมต่ำที่สุดที่พีเอช 3 ซึ่งสามารถกำจัดได้ทั้งหมดที่ความเข้มข้นสูงสุด 120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 69.05 สำหรับ พีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมสูงสุด คือ พีเอช 4 โดยคิดเป็นร้อยละ 96.57 สำหรับสารดูดซับแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดโดยการดูดซับมีค่าต่ำที่สุดที่พีเอช 3, 4 และ 5 ซึ่งสามารถกำจัดได้ คิดเป็นร้อยละ 62.64, 92.11 และ 91.80 ตามลำดับ ข้อมูลดังภาคผนวก ง ตาราง ง-1 และดังรูปที่ 4.14 จะสังเกตว่าค่าร้อยละการกำจัดรวมของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมีค่ามากกว่าร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง ดังนั้นแสดงว่ามีการตกตะกอนของทองแดงเกิดขึ้น ซึ่งค่าร้อยละของทองแดงที่ตกตะกอนสามารถคำนวณได้จากชุดควบคุมซึ่งไม่เติมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง โดยค่าร้อยละการตกตะกอนของทองแดงที่เกิดขึ้นที่พีเอช 3 ถึง 5 คือ 0.98, 1.84 และ 3.08 ดังรูปที่ 4.15 จะสังเกตว่าทองแดงจะตกตะกอนมากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของโลหะส่วนใหญ่ขึ้นกับค่าพีเอช โดยทองแดงสามารถเกิดตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ในช่วงพีเอชประมาณ 6-11 ดังสมการที่ 4.1 (มันลิน และมันรักษ์, 2545)



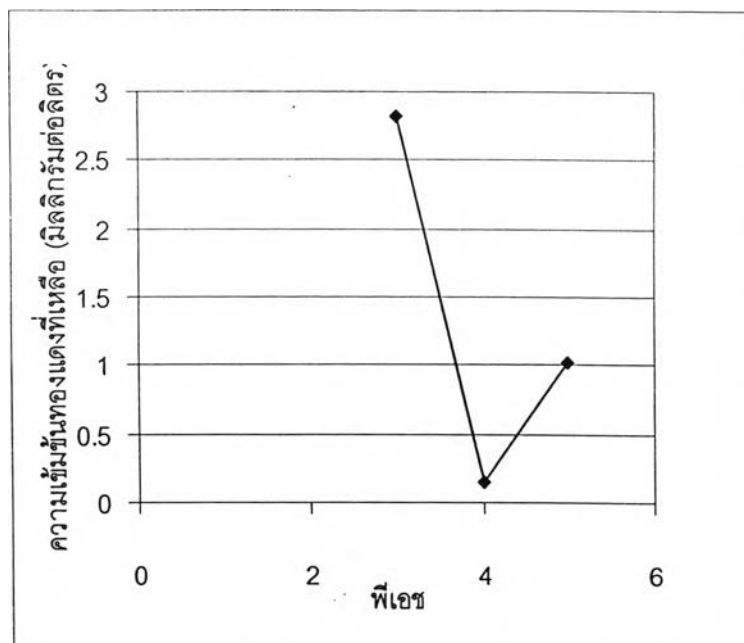


รูปที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดของแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับ จากเปลือกมันสำปะหลัง แบบที่ 2



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโดยการตกตะกอนของชุดควบคุม ที่พีเอช 3, 4 และ 5

จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วย สารดูดซับ แบบที่ 2 ที่พีเอช 3 ถึง 5 ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยสารดูดซับแบบที่ 2 ที่ฟี่เอช 3 ถึง 5

4.3.2 ผลการทดสอบหาเวลาอิ่มตัวในการดูดติดผิว

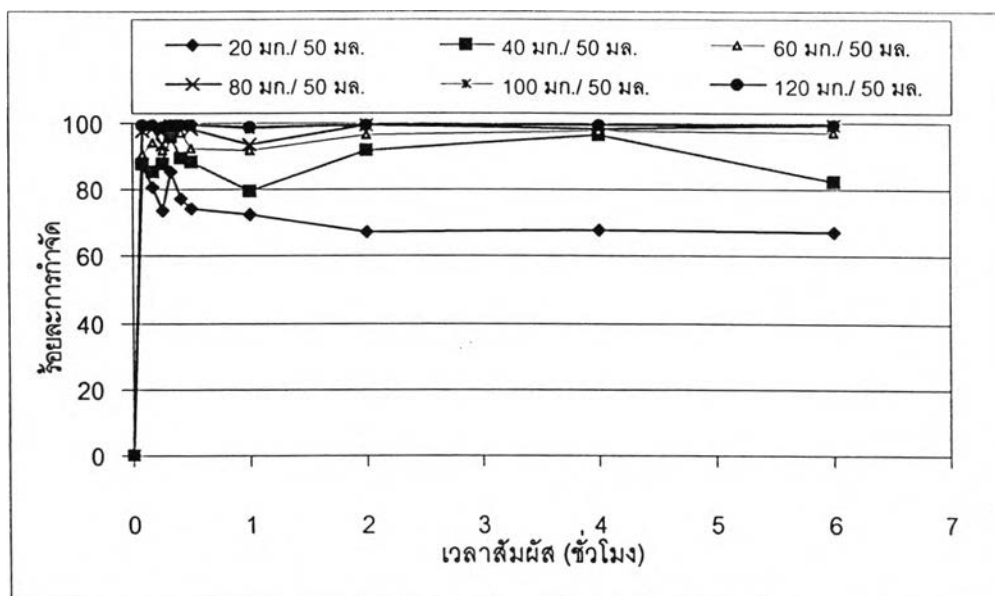
4.3.2.1 ผลการทดสอบหาเวลาอิ่มตัวในการการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

แบบที่ 1

ทำการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ปริมาณ 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง เดิมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ฟี่เอช 5 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดได้จากการทดลองดังกล่าว จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีจนถึง 3 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลา นำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ดังภาคผนวก จ ตาราง จ-7 และผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.17

การทดลองแบบแบตช์ (Batch Test) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารดูดซับ 6 ค่า เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของการดูดติดผิว ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดทองแดงเกิดขึ้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเกิดขึ้นเนื่องจากความ

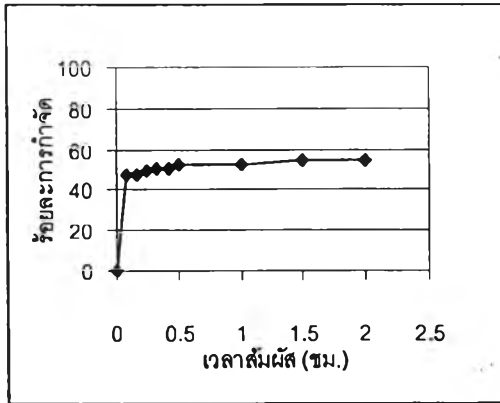
ป็นป่วน เพราะประจุเกิดการเคลื่อนที่เข้า และออกจากสารดูดซับทำให้อ้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้น แล้วลดลง และเพิ่มขึ้นอีก และเริ่มคงที่เป็นส่วนมาก ตั้งแต่เวลา 1 ชั่วโมง เป็นต้นไป ดังรูปที่ 4.17



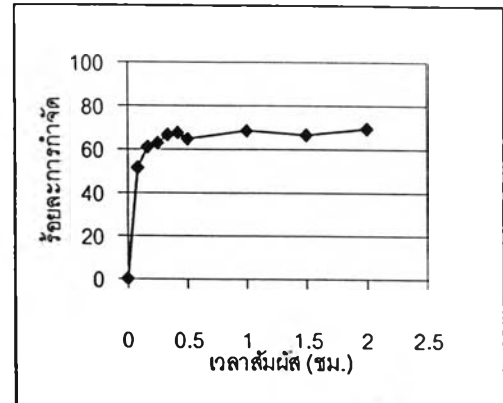
รูปที่ 4.17 ผลของเวลาสัมผัสดังกล่าวของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ที่ปริมาณต่างๆ

ผลของเวลาสัมผัสดังกล่าวต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ปริมาณต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงแค่เวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.18 กราฟทุกปริมาณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสดังกล่าวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.18 (ก) พบว่าเมื่อปริมาณถ่านเพิ่มขึ้นระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลจะลดลงโดยปริมาณสารดูดซับ 20 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 65.23 เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาสัมผัสดังกล่าวเพิ่มขึ้น และการดูดติดผิวของถ่าน เข้าสู่สมดุล โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเริ่มคงที่ มีค่าเท่ากับเวลาสัมผัสดังกล่าว 120 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่สมดุลมีค่าทองแดงเหลือในน้ำ เท่ากับ 3.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.18 (ข) ที่ปริมาณสารดูดซับ 40 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ในช่วงเวลาสัมผัสดังกล่าว 120 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าสูงสุดร้อยละ 90.01 ดังรูปที่ 4.18 (ค) ปริมาณสารดูดซับ 60 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่าง มีประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 88.68-97.65 มีลักษณะการดูดติดผิวคล้ายกันกับ ดังรูปที่ 4.18 (ง) ที่ปริมาณสารดูดซับ 80 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่เวลาสัมผัสดังกล่าว 25 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 97.65 ดังรูปที่ 4.18 (จ) ที่ปริมาณสารดูดซับ 100 มิลลิกรัม ต่อ 50 มิลลิลิตร

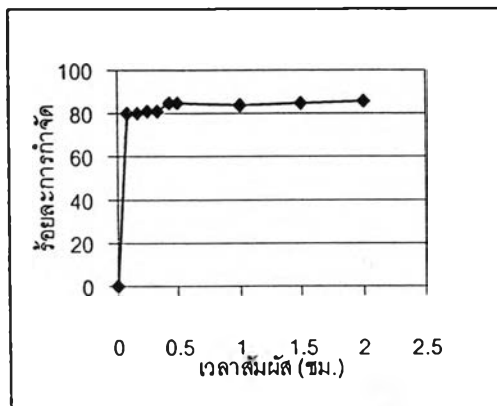
มีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 10 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 97.45 (จ) ใน 2, 2, 2, 0.42, 0.17 และ 0.08 ชั่วโมง ตามลำดับ



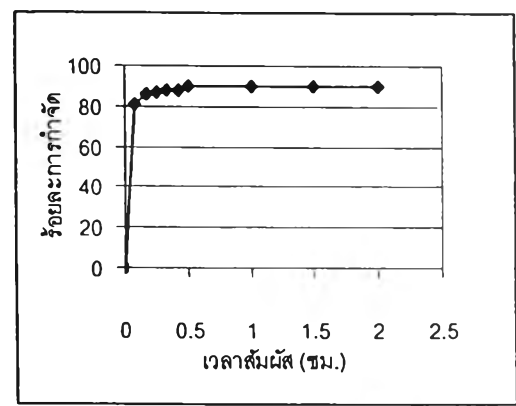
ก) ถ่านกัมมันต์ 20 มก. / 50 มล. น้ำตัวอย่าง



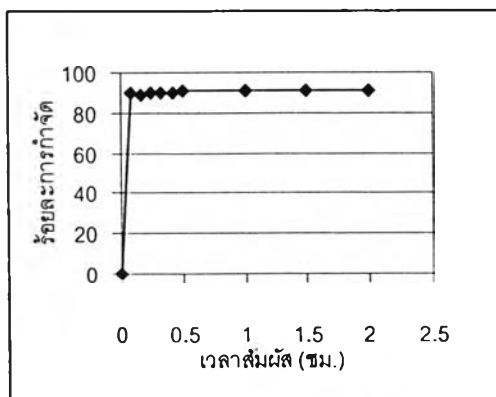
ข) ถ่านกัมมันต์ 40 มก. / 50 มล. น้ำตัวอย่าง



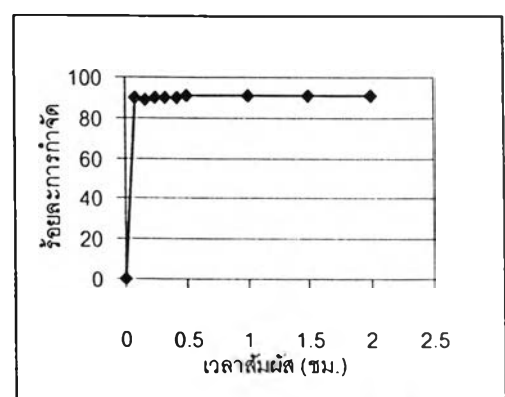
ค) ถ่านกัมมันต์ 60 มก. / 50 มล. น้ำตัวอย่าง



ง) ถ่านกัมมันต์ 80 มก. / 50 มล. น้ำตัวอย่าง



จ) ถ่านกัมมันต์ 100 มก. / 50 มล. น้ำตัวอย่าง

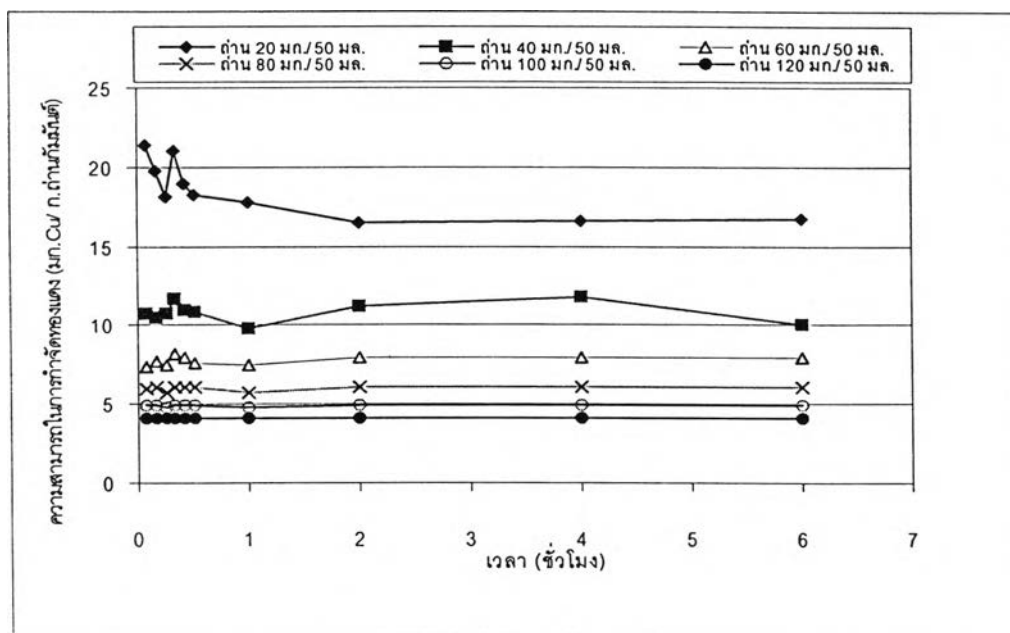


ฉ) ถ่านกัมมันต์ 120 มก. / 50 มล. น้ำตัวอย่าง

รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1

ปริมาณสารดูดซับ 20 ถึง 120 มิลลิกรัม ต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่าง ๆ

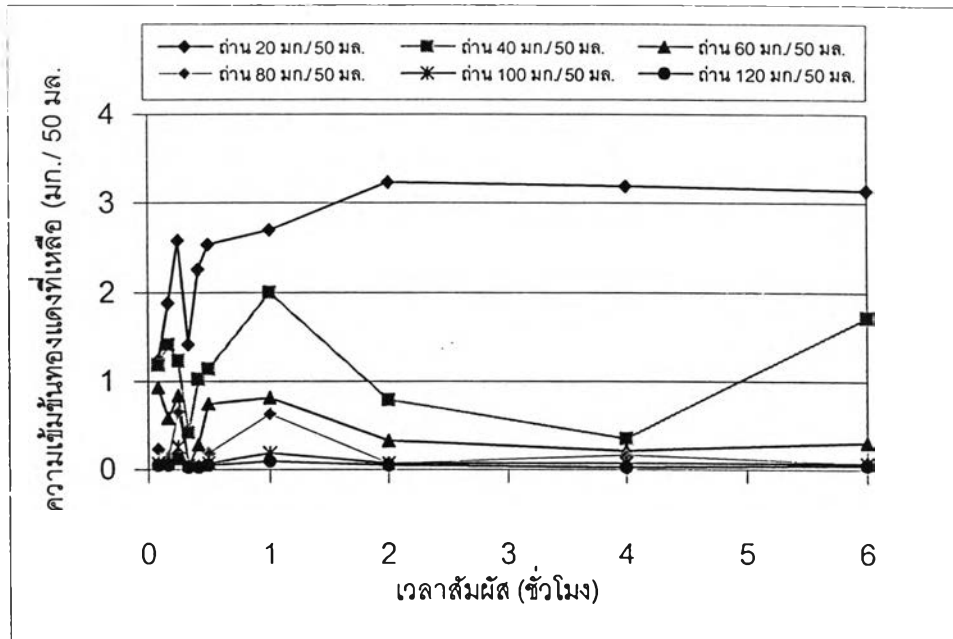
ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าร้อยละในการกำจัดทองแดงโดยการดูดซับที่สมดุลเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 65.23, 90.01, 94.80, 97.75, 97.45 และ 97.65 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาปริมาณถ่านต่อลิตรน้ำตัวอย่างมากขึ้น ส่งผลระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณมากขึ้น ทองแดงถูกกำจัดได้เร็วจึงเข้าสู่สมดุลเร็วกว่า ดังนั้นสรุปได้ว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลจะเร็วมากขึ้นและร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้เพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงทั้งหมดจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาการกำจัดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาสัมผัสเดียวกันความสามารถในการกำจัดทองแดงทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านลดลง โดยค่าความสามารถในการกำจัดทองแดงทั้งหมดที่สมดุล (Removal Capacity) สำหรับสารดูดซับ แบบที่ 1 ปริมาณ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 16.45, 11.26, 7.90, 6.10, 4.87 และ 4.07 มิลลิกรัมทองแดง ต่อกรัมสารดูดซับ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสามารถในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากการทดลองยังพบว่าค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลาสัมผัสเดียวกันก็จะพบว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณมาก เมื่อทราบความเข้มข้นของ

ทองแดงที่เหลืออยู่ที่สมดุลของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะเพิ่มขึ้น ลดลง และเพิ่มขึ้น ก่อนเข้าสู่จุดสมดุล เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน ดังรูปที่ 4.20

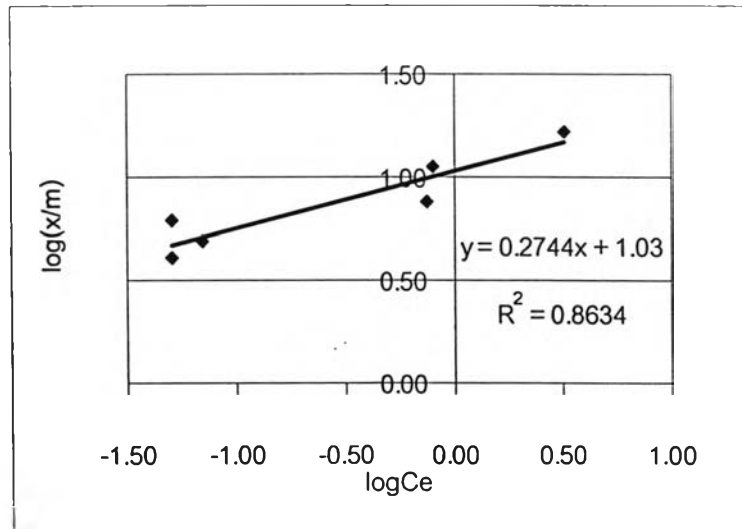


รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัด
ด้วยถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ปริมาณต่าง ๆ

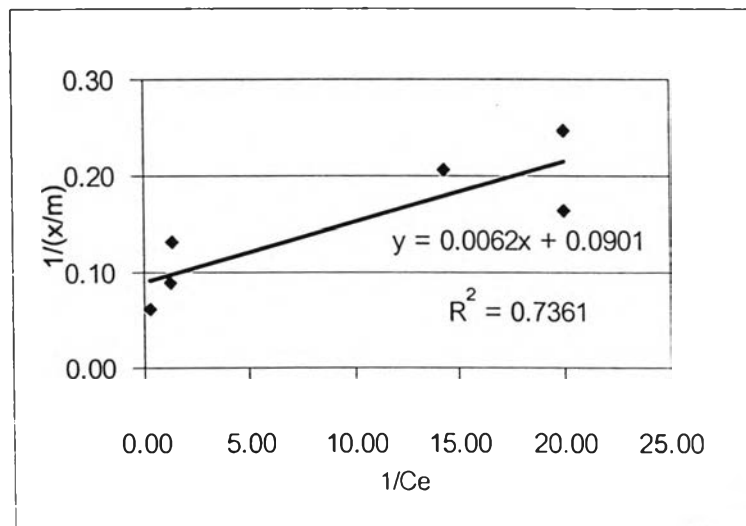
ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการกำจัดทองแดงโดยถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 มากที่สุด ถึง 10.72 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัมสารดูดซับ ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 เวลา 0.08 ชั่วโมง ที่ปริมาณ 20 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง และยังมีแนวโน้มที่อาจจะเพิ่มขึ้นอีกได้ และเมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบ ฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์ ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

และค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.8634 และ 0.7361 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงดังนี้ $\log(x/m) = 0.2744(\log C_e) + 1.0300$ และสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ แสดงดังนี้ $1/(x/m) = 0.0062(1/C_e) + 0.0901$ จากผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดทองแดงมากกว่าสมการแบบแลงมัวร์ เนื่องจาก R^2 มีค่ามากกว่า ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

พบว่าให้ค่าความสามารถในการกำจัดทองแดง ของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 10.72 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัมสารดูดซับ แบบที่ 1



รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1



รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมแลงมัวร์ ของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1

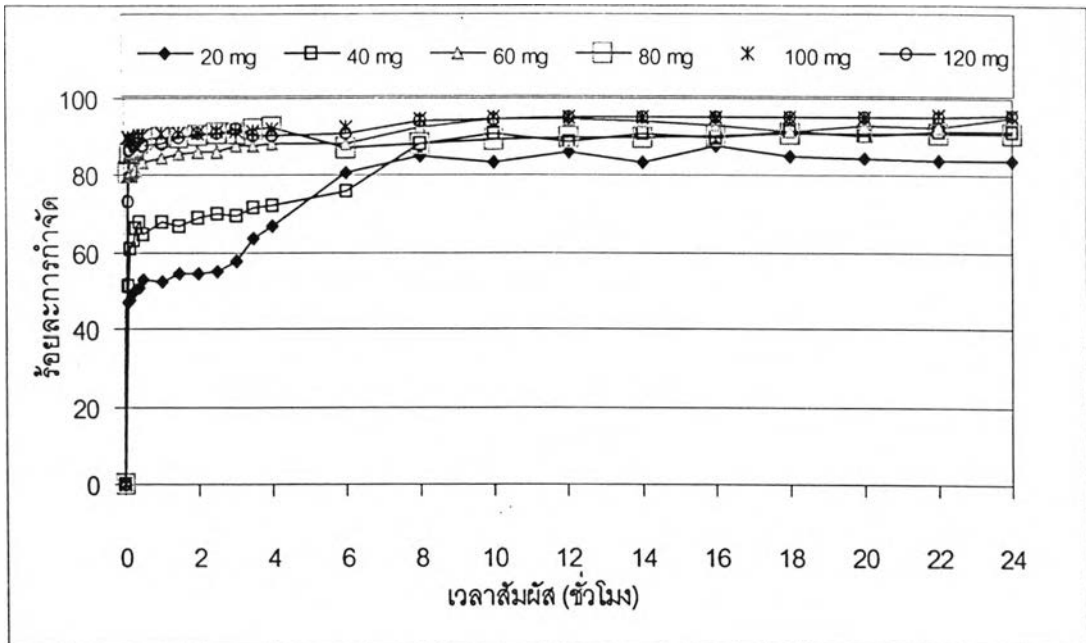
4.3.2.2 ผลการทดสอบหาเวลาอิ่มตัวในการการดูดติดผิวของสารดูดซับแบบที่ 2

การทดลองโดยใช้สารดูดซับ แบบที่ 2 ปริมาณ 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง เดิมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น

10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดที่ได้จากการทดลองดังกล่าว จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที จนถึง 3 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่าง ๆ ของสารดูดซับ แบบที่ 2 ดังภาคผนวก จ ตารางที่ ๑-14

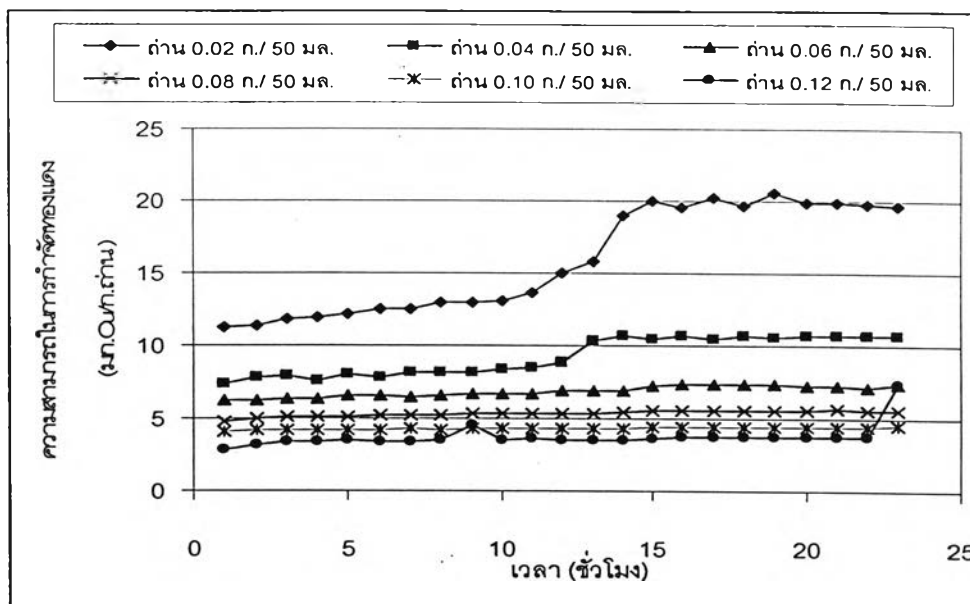
ทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch Test) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารดูดซับ 6 ค่า เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของการดูดติดผิว ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดทองแดงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และคงที่ตั้งแต่เวลา 8 ชั่วโมง เป็นต้นไป ผลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ปริมาณต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงแค่เวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.23 กราฟทุกปริมาณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงขึ้น เมื่อเวลาสัมผัสเพิ่ม ปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลจะลดลงโดยปริมาณสารดูดซับ 0.02 กรัมสารดูดซับ ต่อ 50 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่าง ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และการดูดติดผิวทองแดงเข้าสู่สมดุล โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเริ่มคงที่ มีค่าเท่ากับเวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง โดยมีค่าความเข้มข้นการกำจัดทองแดงเหลือในน้ำที่สมดุล มีค่าเท่ากับ 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร รูปที่ 4.23 ที่ปริมาณสารดูดซับ 40 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ในช่วงเวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดโดยการดูดซับมีค่าร้อยละ 90.86 ที่ปริมาณสารดูดซับ 60 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง มีลักษณะการดูดติดผิวคล้ายกันกับ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลา 8 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 92.71 ที่ปริมาณสารดูดซับ 80 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง มีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่เวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดโดยการดูดซับเท่ากัน ร้อยละ 94.67 ส่วนที่ปริมาณสารดูดซับ 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง อัตราการกำจัดทองแดงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 8 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดโดยการดูดซับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 94.02 และร้อยละ 94.67 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า การเข้าสู่สมดุลของสารดูดซับ สำหรับถ่านปริมาณมีค่าเท่ากับ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลได้ภายใน 10, 10, 8, 8, 8 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ โดยพบว่าร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าร้อยละในการกำจัดทองแดงทั้งหมดที่สมดุล มีค่าเท่ากับ 83.35, 90.86, 92.71, 94.67, 94.02 และ 94.67 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.23



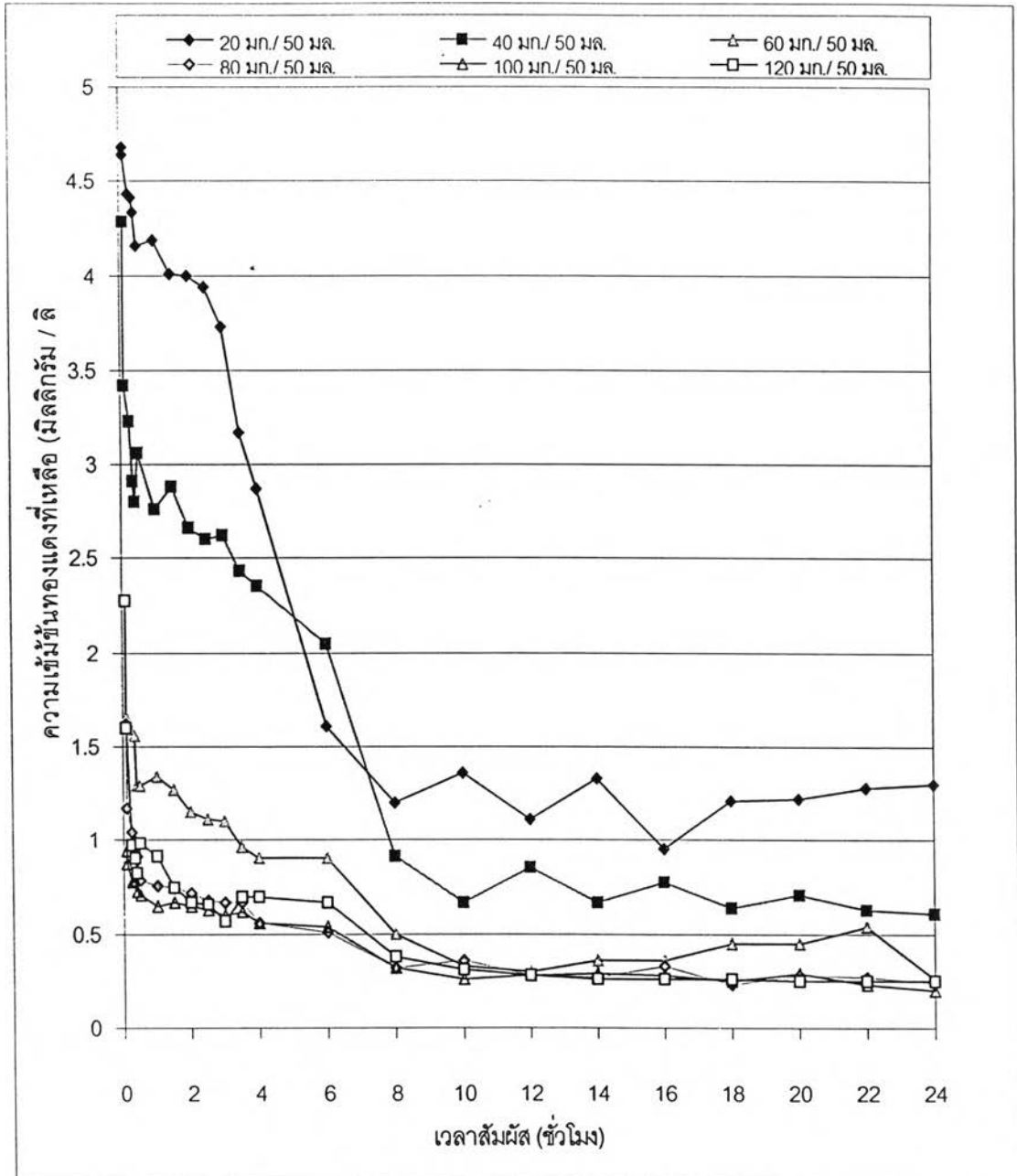
รูปที่ 4.23 ผลของเวลาสัมผัสของการดูดติดผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2 ที่ปริมาณต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาปริมาณสารดูดซับต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างมากขึ้น ส่งผลระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณมากขึ้น ทองแดงถูกกำจัดได้เร็ว จึงเข้าสู่สมดุลเร็วกว่า ดังนั้นสรุปได้ว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลจะเร็วมากขึ้น และร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.24 พบว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงทั้งหมดจะเพิ่มมากขึ้น ตามเวลาการกำจัดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาสัมผัสเดียวกันความสามารถในการกำจัดทองแดงทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านลดลง โดยค่าความสามารถในการกำจัดทองแดงทั้งหมดที่สมดุล (Removal Capacity) สำหรับสารดูดซับ แบบที่ 2 ปริมาณ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมสารดูดซับ ต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างที่สมดุล มีค่าเท่ากับ 19.55, 10.64, 7.23, 5.54, 4.40 และ 3.69 มิลลิกรัมทองแดง ต่อกรัมสารดูดซับ ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่าค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลาสัมผัสเดียวกันก็จะพบว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณมากขึ้น ค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อทราบความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ ณ สมดุลของสารดูดซับ ปริมาณต่าง ๆ แล้ว



รูปที่ 4.24 ความสามารถในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยใช้สารดูดซับ แบบที่ 2 ที่ปริมาณต่าง ๆ

พบว่าความเข้มข้นทองแดงที่เหลือจะลดลงมากขึ้นตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาสัมผัสเดียวกันจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นทองแดงที่เหลือที่สมดุล สำหรับสารดูดซับ แบบที่ 2 ปริมาณ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัม ต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 19.55, 10.64, 7.23, 5.54, 4.40 และ 3.69 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัมสารดูดซับ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความเข้มข้นของแดงที่เหลือในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์จากการกำจัด
ด้วยสารดูดซับแบบที่ 2 ปริมาณต่าง ๆ

ผลของประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับที่ปริมาณต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นตามลำดับและให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมากขึ้นด้วยดังนั้นในการหาไอโซเทอมของสารดูดซับ ที่ปริมาณต่าง ๆ ใช้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่แต่ละเวลาสัมผัสที่การดูดติดผิวเข้าสู่สมดุล

4.3.3 ผลการทดสอบหาไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง (แบบที่ 2)

การทดสอบไอโซเทอมของสารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง แบบที่ 2 สำหรับการกำจัดทองแดง ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ผลการทดลองจากการทดลองหาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมของสารดูดซับ ที่เวลาสัมพัทธ์ดำเนินไปจนระบบเข้าสู่สมดุลของสารดูดซับที่ปริมาณต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.6

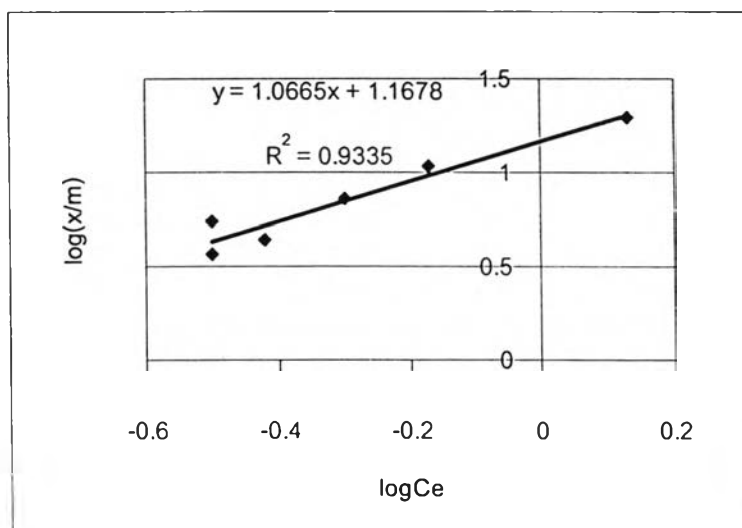
พิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ ผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ และค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ มีค่าเท่ากับ 0.9335 และ 0.8392 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงดังนี้ $\log(x/m) = 1.1678 + 1.0665(\log C_e)$ และสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ แสดงดังนี้ $1/(x/m) = -0.0197 + 0.0817(1/C_e)$ จากผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมพบว่า สมการแบบฟรุนดลิช มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดทองแดง เนื่องจาก R^2 มีค่ามากกว่า ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช พบว่าให้ค่าความสามารถในการกำจัดทองแดงโดยสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังมากที่สุดถึง 19.55 มิลลิกรัมทองแดง ต่อ กรัมสารดูดซับแบบที่ 2

จากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(x/m)$ และ $\log C_e$ เพื่อหาค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด $(x/m)_{\max}$ หรือ (q_{\max}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(x/m)$ และ $\log C_e$ จากสมการ $\log(x/m) = 1.1678 + 1.0665 (\log C_e)$ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(x/m)$ และ $\log C_e$ ได้จุดตัดแกน Y คือ $\log K$ มีค่าเท่ากับ 1.1678 ดังนั้น K มีค่าเท่ากับ 14.72 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัมสารดูดซับแบบที่ 2 ในสมการ $\log(x/m) = 1.1678 + 1.0665 (\log C_e)$ ดังนั้นได้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด $(x/m)_{\max}$ หรือ (q_{\max}) มีค่าเท่ากับ 14.72 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัมสารดูดซับ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการดูดติดผิวของแดงบนสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

ปริมาณสารดูดซับ (มก./ 50 มล. น้ำตัวอย่าง)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น ทองแดงที่เหลือ (มก./ล.)	ร้อยละ การกำจัด	X/M (มก./ก.)
20	10	1.36	83.35	19.55
40	10	0.67	90.86	10.64
60	8	0.50	92.71	7.23
80	8	0.32	94.67	5.54
100	8	0.38	94.02	4.40
120	8	0.32	94.67	3.69

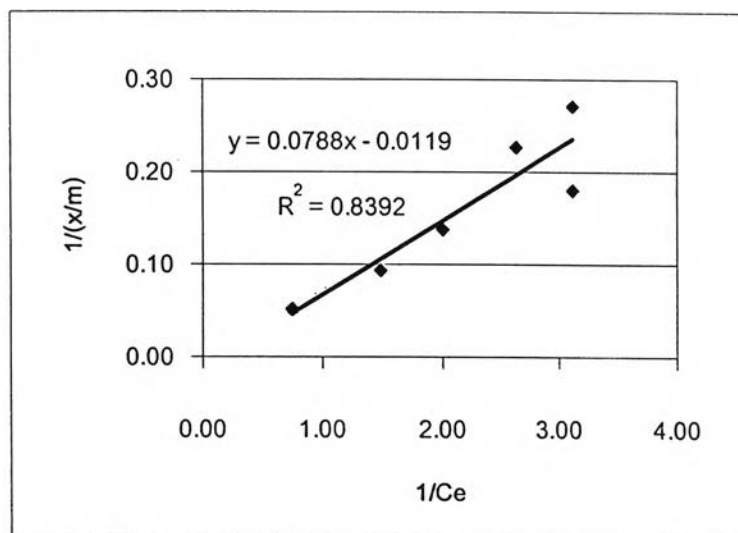
ทำการทดสอบไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)



รูปที่ 4.26 ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิชของการดูดติดผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช คือ

$$\log(x/m) = 1.1678 + 1.0665(\log C_e) \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับแบบแลงมัวร์

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คือ

$$1/(x/m) = -0.0119 + 0.0788(1/(C_e)) \quad (4.3)$$

ค่าคงที่การดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คำนวณได้จากความชันและระยะตัดแกนของสมการที่ 4.3 ในขณะที่ค่าคงที่การดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช คำนวณได้จากความชันและระยะตัดแกนของสมการที่ 4.2

อิทธิพลของรูปแบบไอโซเทอม บอกรถึงการดูดติดผิวที่เหมาะสมและไม่เหมาะสม สามารถพิจารณาได้ โดยพิจารณาจากค่า r^2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง สามารถอธิบายได้ทั้งไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ ฟรุนดลิช และไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ ที่มีค่า r^2 คือ 0.9335 และ 0.8392 ตามลำดับ

ค่า K_L คือค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ a_L คือค่าคงที่ไอโซเทอม ซึ่งค่า a_L ที่น้อยกว่าของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ แสดงถึงแรงดึงดูดที่ไปยังตำแหน่งของทองแดงที่อยู่ตรงกันข้ามน้อยกว่า ค่า q_{max} คือค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของสารดูดซับ หรือคือความสามารถ

ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) ของสารดูดซับกับโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับสารดูดซับสำหรับการดูดติดผิวของแดงบนสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง ค่า R_L ซึ่งเป็นค่าที่ชี้วัดรูปแบบของแต่ละไอโซเทอม ค่า R_L มากกว่า 1 คือ ไม่เหมาะสม R_L เท่ากับ 1 เป็นเส้นตรง, R_L มากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1 เหมาะสม หรือ R_L เท่ากับ 0 ปฏิกริยาย้อนกลับไม่ได้ สำหรับการทดลองนี้ค่า R_L มีค่ามากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1 ถือว่าเหมาะสม

ค่า K_f คือ ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความหนาแน่นของการดูดติดผิว เมื่อค่าความจุการดูดติดผิวมีค่าเท่ากับ 1 โดยที่ถ้าค่า K มากขึ้นเท่าไรก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของการดูดติดผิวมากขึ้น ค่า n คือค่าคงที่ของความแตกต่างกันของพื้นผิว ซึ่งถ้ามีค่าน้อยแสดงว่า มีความแตกต่างของพื้นผิวมาก ซึ่งถ้าค่า n มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าสารดูดซับนั้นมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดี และค่าความชัน $1/n$ บอกระดับความสามารถในการดูดติดผิวของแดงหากมีความชันมาก การดูดติดผิวยิ่งดีขึ้น

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ได้นำมาใช้อธิบายสมดุลการดูดติดผิวของการดูดติดผิวของแดง บนพื้นที่ผิวของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง ดังนั้นการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นของสารดูดซับในการกำจัดของแดง เกิดการดูดติดผิว 2 แบบ ในขณะเดียวกันคือการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งการดูดติดผิวเกิดขึ้นแบบหลาย ๆ ชั้น (Multilayer) ซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อนโดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและการดูดติดผิวทางเคมี

ตารางที่ 4.7 สรุปความสามารถในการดูดติดผิวของแดงของสารดูดซับแบบแบดซ์

สารดูดซับ	X/M (มก.Cu/ก.)	R^2	
		แบบฟรุนดลิช	แบบแลงมัวร์
แบบที่ 1	10.72	0.8634	0.7361
แบบที่ 2	14.72	0.9335	0.8392

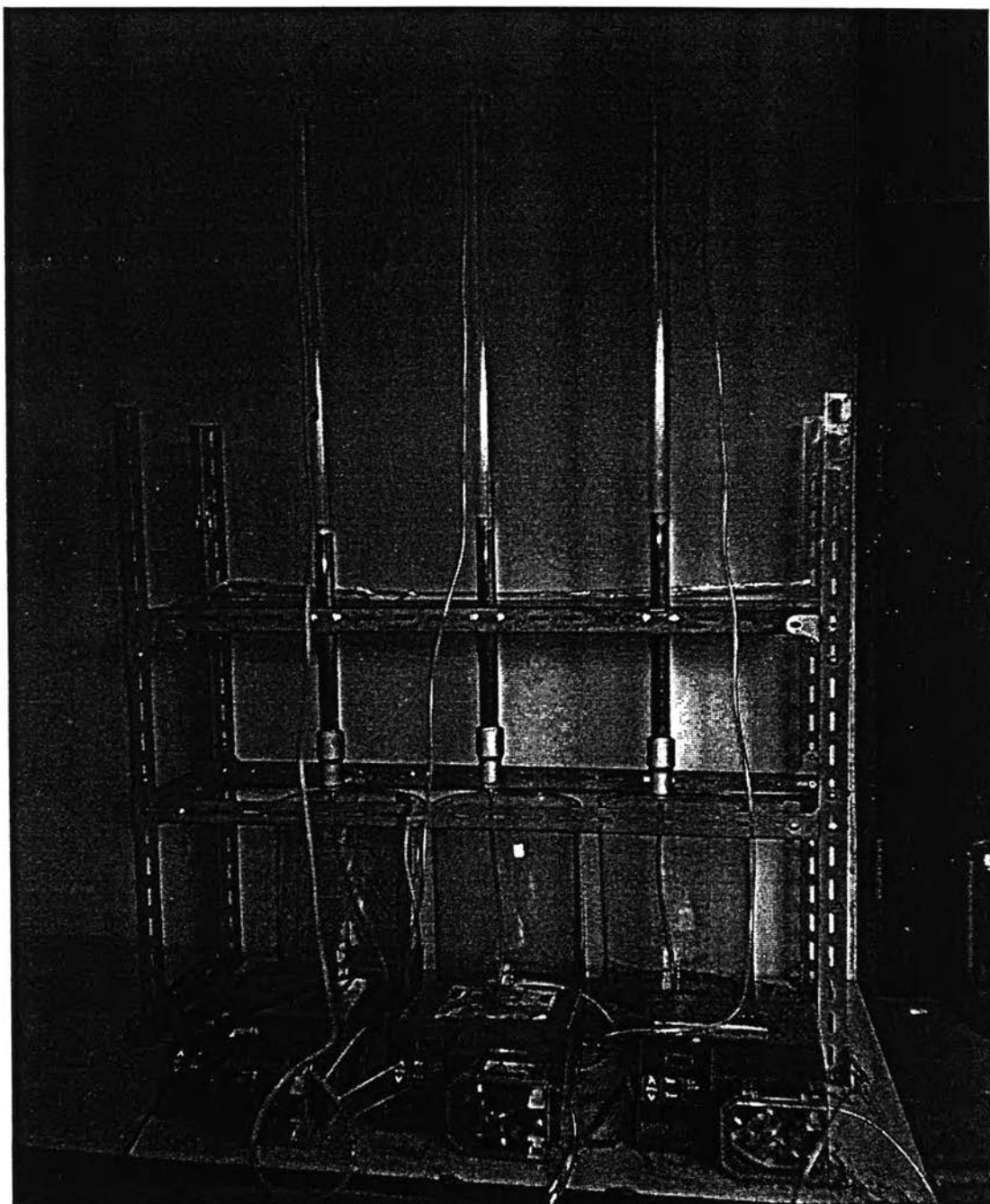
4.4 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorptive Column)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพของสารดูดซับ แบบที่ 2 โดยการนำไปใช้จริงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ มีความสูงของตัวกลางที่ 0.30 เมตร ซึ่งการทดสอบการดูดติดผิวของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบต่อเนื่อง ใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร สูง 1 เมตร คิดเป็นปริมาตรตัวกรอง (Bed volume) 0.1513 ลิตร ป้อนน้ำเสียแบบไหลลง (Down Flow) โดยแปรผันเวลาสัมผัสถึงเปล่า (Empty Bed Contact Time) 3 ค่า คือ 10, 20 และ 30 นาที อัตราการไหลน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.8 สารดูดซับที่ใช้ทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องคือสารดูดซับแบบที่ 2 ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และล้างสารด้วยสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต บดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 และค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 80 เพื่อคัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ 0.180-0.850 มิลลิเมตร ให้มีความสูงของชั้นสารดูดซับ 0.3 เมตร

ตารางที่ 4.8 การทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

คอลัมน์	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา สัมผัส (นาที)	ภาระบรรทุกทาง ไฮดรอลิกซ์ (ลิตร/ชม./ตร.ม.)
A	0.912	10	10	1,800.77
B	0.456	10	20	900.38
C	0.304	10	30	600.26

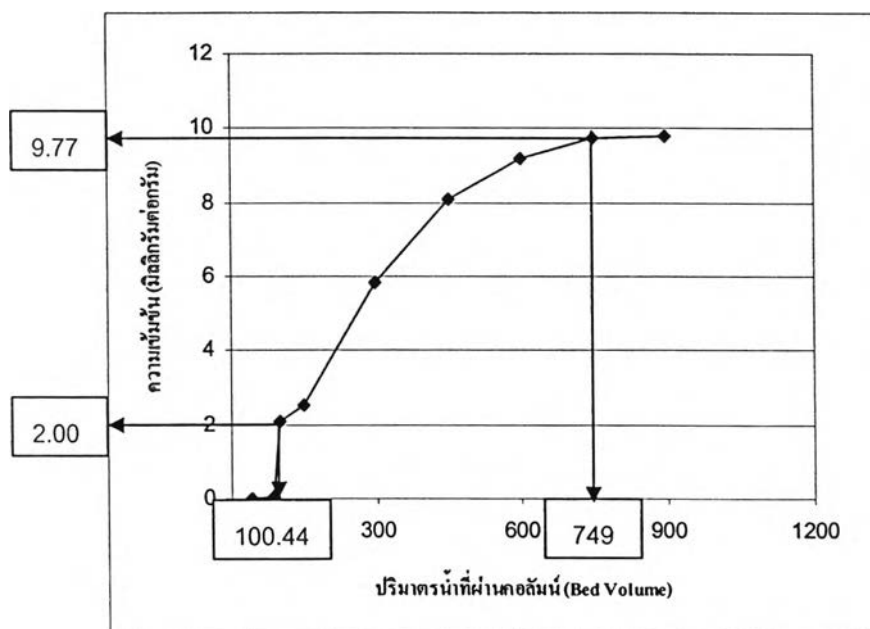
การเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บที่ทางน้ำออก และนำไปทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ความเข้มข้นของทองแดงคงเหลือ และพีเอช กำหนดจุดเบรคทอร์จที่ความเข้มข้นทองแดงที่มีค่าใกล้เคียง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากที่ความเข้มข้นทองแดงที่มีค่าใกล้เคียง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาพของสารดูดซับหมดสภาพการใช้งาน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง

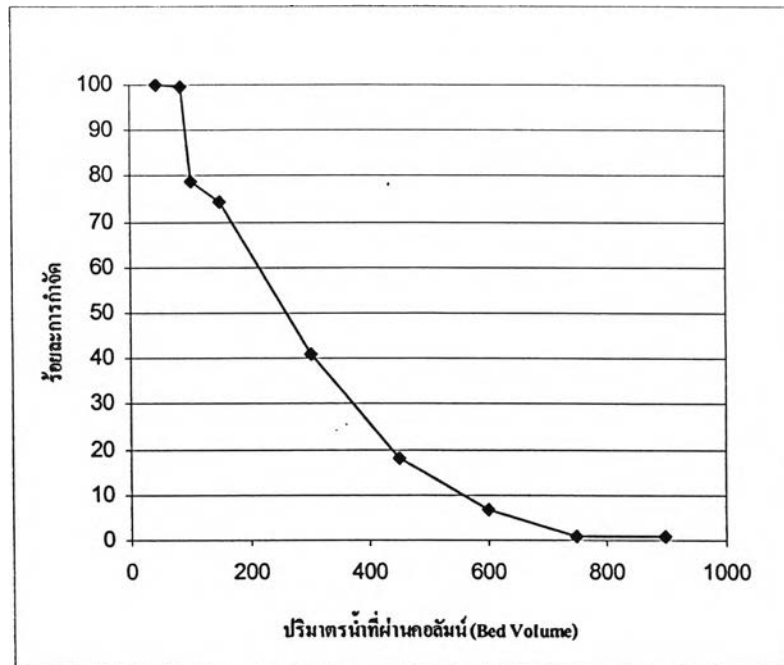
จากผลการทดลองใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการดูดติดผิวทองแดง ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์

0.912 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองของกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทอร์จ์ในถังดูดติดผิว ดังรูปที่ 4.29 จากการวัดค่าการดูดซับ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของแดงในน้ำตัวอย่าง พบว่า 48 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน ที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมงทุกวันจนกระทั่งสารดูดซับหมดสภาพการใช้งาน คิดเป็นปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัด 899 ปริมาตรเบต เมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปจนถึงจุดเบรคทอร์จ์ที่กำหนดให้มีปริมาณของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าประมาณ 9.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้น คือ 749 ปริมาตรเบต และความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น เมื่อปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ปริมาณของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มคงที่ ประมาณ 9.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง แสดงว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัดทองแดง



รูปที่ 4.29 เส้นโค้งเบรคทอร์จ์ของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดทองแดงที่เวลากัก 10 นาที

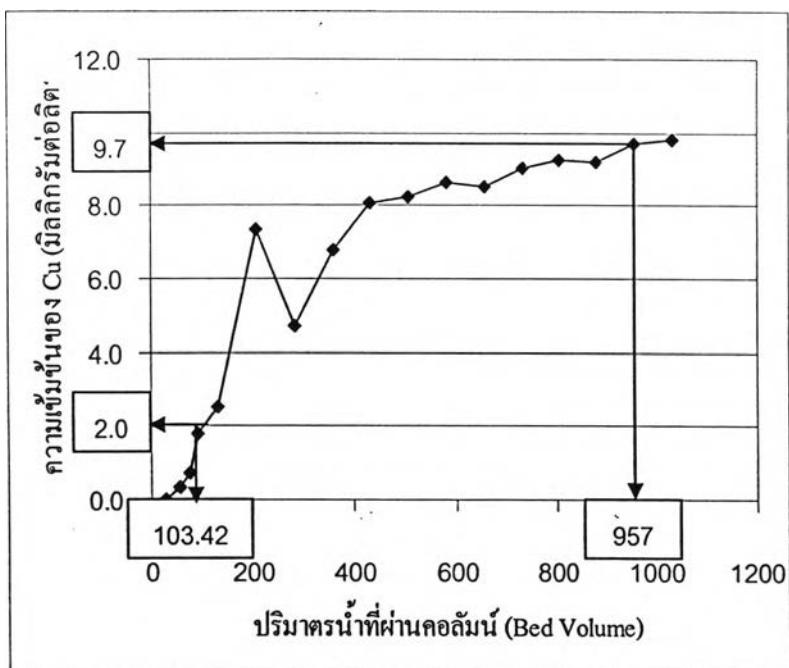
เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด ดังรูปที่ 4.30 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะลดลง เมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงจุดเบรคทอร์จ์ ที่ 749 ปริมาตรเบต และโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงลดลงเท่ากับ 1.11% ซึ่งจะเห็นได้ว่าทองแดงของน้ำที่ผ่านการกำจัด ซึ่งสอดคล้องกับผลความเข้มข้นของทองแดง และประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10 นาที

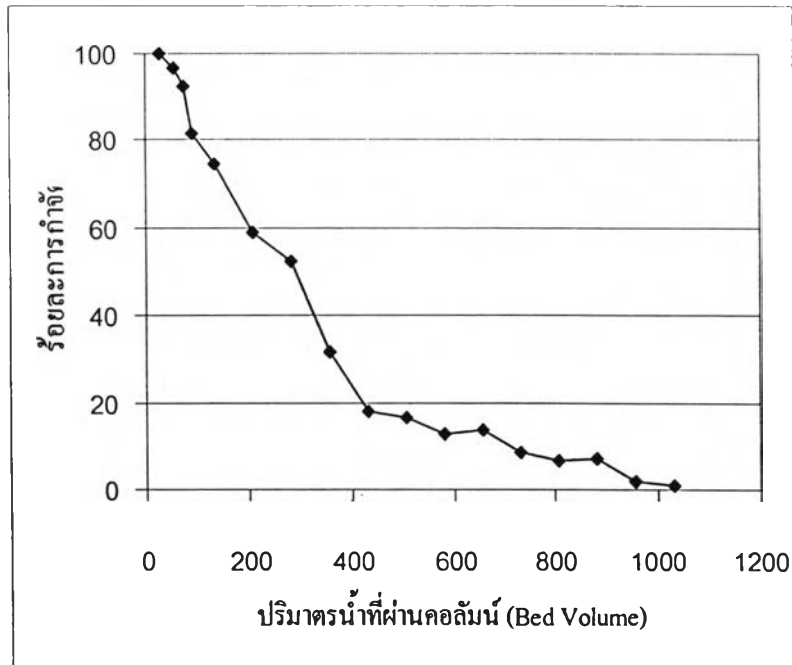
4.4.1 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที

จากการใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการดูดติดผิวทองแดงที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์ 0.458 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองของกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทิจ์ในถังดูดติดผิวได้ ดังรูปที่ 4.31 จากการวัดค่าการดูดซับเพื่อหาค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำตัวอย่าง พบว่า 48 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน ที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมงทุกวันจนกระทั่งสารดูดซับหมดสภาพการใช้งาน ที่เวลาการทดลอง 360 ชั่วโมง คิดเป็นปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัด 1,032 ปริมาตรเบต เมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปจนถึงจุดเบรคทิจ์ที่กำหนดให้มีปริมาณทองแดงเหลืออยู่ 9.70 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 957 ปริมาตรเบต



รูปที่ 4.31 เส้นโค้งเบรคทวร์จของดังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดทองแดงที่เวลากัก 20 นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด ดังรูปที่ 4.32 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะลดลง เมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงจุดเบรคทวร์จ ที่ 957 ปริมาตรเบด และโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเท่ากับ 1.81 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าทองแดงของน้ำที่ผ่านการกำจัด ซึ่งสอดคล้องกับผลความเข้มข้นของทองแดง และประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

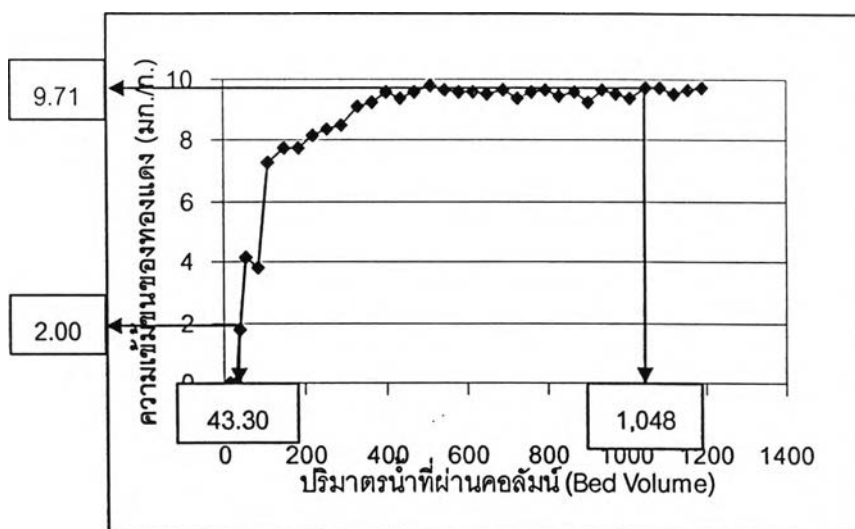


รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงแบบต่อเนื่อง
ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที

4.4.2 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที

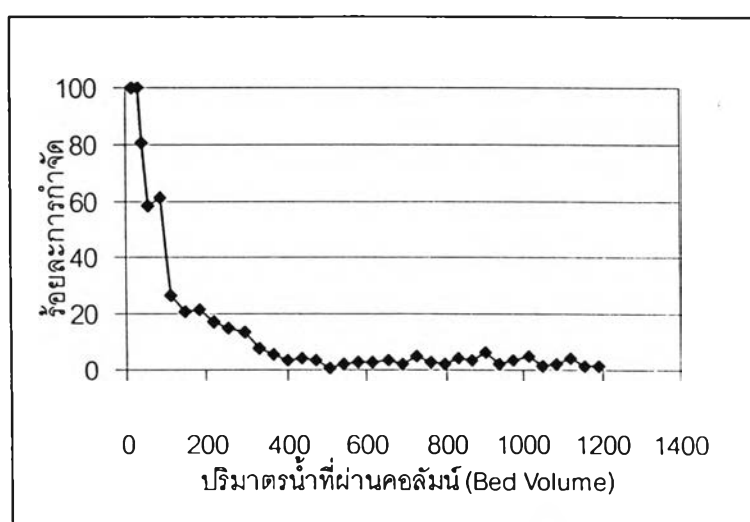
จากการใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการดูดติดผิวทองแดงที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์ 0.948 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองของกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทวร์จในถังดูดติดผิวได้ ดังรูปที่ 4.31 จากการวัดค่าการดูดซับ เพื่อหาค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำตัวอย่าง พบว่า 48 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน ที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างทุก ๆ 24 ชั่วโมงทุกวันจนกระทั่งสารดูดซับหมดสภาพการใช้งาน ปริมาณของทองแดงในน้ำที่ออกจากถังดูดติดผิวมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้น 43.30 ปริมาตรเบด จากความชันของเส้นโค้งเบรคทวร์จดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปจนถึงจุดเบรคทวร์จที่กำหนดให้มีปริมาณของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าประมาณ 9.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดทั้งสิ้นคือ 1,048 ปริมาตรเบด และความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง นั่นคือที่ปริมาณความเข้มข้น 9.88 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่า

ความสามารถในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัดทองแดง



รูปที่ 4.33 เส้นโค้งเบรคทราจี้ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่เวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด ดังรูปที่ 4.34 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะลดลง เมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึง 1,048 ปริมาตรเบด ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงลดลงอย่างรวดเร็วเหลือร้อยละ 1.72 ประสิทธิภาพลดลงจนกระทั่งถึงที่ 1,192 ปริมาตรเบด และประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเริ่มคงที่ มีค่าใกล้เคียงร้อยละ 1



รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที

จากผลการทดลองการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง สามารถสรุปปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดทองแดงของถังดูดติดผิว ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10, 20 และ 30 นาที ที่ความเข้มข้นของทองแดงคงเหลือในน้ำเสียประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ดังตารางที่ 4.9

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ในถังดูดติดผิว 1 ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10 นาที สามารถกำจัดทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง 9.77 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณน้ำที่กำจัดได้ทั้งสิ้น 749 ปริมาตรเบต หรือ คิดเป็นปริมาตร 113.80 ลิตร ในถังดูดติดผิว 2 ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง 9.70 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณน้ำที่กำจัดได้ทั้งสิ้น 957 ปริมาตรเบตหรือคิดเป็นปริมาตร 145.40 ลิตร และถังดูดติดผิว 3 ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง 9.71 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณน้ำที่กำจัดได้ทั้งสิ้น 1,048 ปริมาตรเบตหรือคิดเป็นปริมาตร 159.23 ลิตร

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

เวลาสัมผัส (นาที)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ถูกบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรเบต	ทองแดงถูกกำจัด (มิลลิกรัม) (X)	ปริมาณถ่าน (กรัม) (m)	ความสามารถดูดติดผิว (X/m)
1. คำนวณที่จุดยุติ						
10	0.912	113.80	749	353.19	50	7.06
20	0.456	145.40	957	365.52	50	7.31
30	0.304	159.23	1,048	196.89	50	3.94
2. คำนวณที่ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร						
10	0.912	15.26	100.44	146.07	50	2.92
20	0.456	15.71	103.42	142.93	50	2.86
30	0.304	6.58	43.30	59.36	50	1.19

ถึงเปล่า 20 นาที สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง 9.70 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณน้ำที่กำจัดได้ทั้งสิ้น 957 ปริมาตรเบต หรือ คิดเป็นปริมาตร 145.40 ลิตร และ

ถังดูดติดผิว 3 ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง 9.71 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาตรน้ำที่กำจัดได้ทั้งสิ้น 1,048 ปริมาตรเบต หรือ คิดเป็นปริมาตร 159.23 ลิตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดติดผิวทองแดงในถังดูดติดผิว 1, 2 และ 3 พบว่าที่ความเข้มข้นทองแดงคงเหลือในน้ำเสีย 9.77, 9.70 และ 9.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ถังดูดติดผิว 3 ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียได้มากที่สุด คือ 1,048 ปริมาตรเบต รองลงมาคือ ถังดูดติดผิว 2 ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที และ ถังดูดติดผิว 1 ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10 นาที ที่ 1,048, 957 และ 749 ปริมาตรเบต ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเฉลี่ยจนถึงจุดเบรคทอร์จ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับปริมาตรน้ำที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงด้วยสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบต่อเนื่อง เนื่องจากถังดูดติดผิว 1 ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10 นาที มีอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนสู่คอลัมน์เร็วที่สุดคือ 0.912 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้างเป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของทองแดงในน้ำทิ้งมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้นเร็วกว่า ถังดูดติดผิว 2 ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที ซึ่งมีอัตราการไหล 0.456 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ถังดูดติดผิว 3 ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 30 นาที มีอัตราการไหลของน้ำเสียช้าที่สุด คือ 0.304 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งทำให้เกิดการสะสมตัวของทองแดงที่ผ่านชั้นของสารดูดซับที่ละน้อยจนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของทองแดงออกมากับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดในกรณีนี้สารดูดซับจะถูกใช้ในการดูดซับอย่างเต็มที่

4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

4.5.1 วัตถุดิบ สารเคมี และค่าไฟฟ้าสำหรับใช้ในการผลิต

ค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง ประกอบด้วยค่าวัตถุดิบ ค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้า ดังนี้

1. ค่าวัตถุดิบสำหรับใช้ในการผลิต

ในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง วัตถุดิบที่ใช้คือเปลือกมันสำปะหลัง ที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานแป่งมันสำปะหลัง โดยปกติเปลือกมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ โรงงานจะขายให้กับเกษตรกรเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบใช้สำหรับการเพาะเห็ดฟางหรือนำเปลือกมันสำปะหลังไปตากแดดให้แห้งแล้วนำไปเป็นอาหารปลาเลี้ยงไว้ขายซึ่งลดต้นทุนการเลี้ยงปลา ซึ่งราคาของเปลือกมันสำปะหลัง ราคาตันละ 100 บาท

2. ค่าสารเคมีสำหรับใช้ในการผลิต

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการผลิตคือ สารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 85% แบบเกรดทางพาณิชย์ ราคาลิตรละ 20 บาท

2.2 สารเคมีที่ใช้ในการผลิตคือ สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต แบบเกรดทางพาณิชย์ ราคาκιโลกรัมละ 10 บาท

3. ค่าไฟฟ้าจากเตาเผา

เตาเผาใช้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ใช้เวลาการเผาทั้งหมดเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาเผาใช้ไฟฟ้าประมาณ 3.52 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง คิดเป็นหน่วยไฟฟ้า 10.56 กิโลวัตต์ และค่าไฟฟ้า โดยประมาณ 1.8 บาทต่อกิโลวัตต์ คิดเป็นค่าไฟฟ้า 19 บาท

4.5.2 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง

จากการศึกษาพบว่าร้อยละของสารดูดซับที่ผลิตได้จากเปลือกมันสำปะหลัง คือ 35.04 โดยคิดจากการผลิตสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง 1,000 กรัม ซึ่งในการผลิตสารดูดซับ

1,000 กรัม ต้องใช้เปลือกมันสำปะหลัง 2,628.81 กรัม เปลือกมันสำปะหลัง ราคาตันละ 100 บาท คิดเป็นราคาเปลือกมันสำปะหลังที่ใช้ประมาณ 0.26 บาทต่อกิโลกรัม

สารละลายกรดฟอสฟอริกใช้ในอัตราส่วนเปลือกมันสำปะหลังต่อสารละลายกรดฟอสฟอริก 1:2 โดยน้ำหนัก ในการผลิตสารดูดซับ 1,000 กรัม คิดเป็นสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ต้องใช้ 2.00 ลิตร คิดเป็นเงิน 40 บาท และรวมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 1 กิโลกรัม ๆ ละ 10 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตสารดูดซับ 1,000 กรัม จากเปลือกมันสำปะหลัง 2,628.81 กรัม เป็นจำนวนเงินเท่ากับ $0.29 + 40 + 19 + 10 = 69.26$ บาท

ความสามารถในการกำจัดทองแดงสูงสุด มีค่าเท่ากับ 14.72 มิลลิกรัม จากสารดูดซับแบบที่ 2 ปริมาณ 1 กรัม หากความสามารถในการกำจัดทองแดงสูงสุด 1,000 กรัม ต้องใช้สารดูดซับแบบที่ 2 เท่ากับ 67,934.78 กรัม

ดังนั้นสรุปได้ว่า การผลิตสารดูดซับแบบที่ 2 เท่ากับ 1,000 กรัม ต้องเสียค่าใช้จ่าย 69.26 บาท หากใช้สารดูดซับแบบที่ 2 เท่ากับ 67,934.78 กรัม ต้องเสียค่าใช้จ่าย 4,705.16 บาทต่อการกำจัดทองแดง 1,000 กรัม

****หมายเหตุ**** ราคาดังกล่าวคิดเฉพาะค่าวัตถุดิบ ค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้า เท่านั้น