บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยนี้เป็นการนำเอาเส้นใยปาล์ม มาปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ ไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักโดยทำการทดลองแบบทีละเท ซึ่งในการวิจัยนี้โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี

4.1 การศึกษาถึงลักษณะพื้นฐานของเส้นใยปาล์ม

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง ซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า เส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองเมื่อนำมาตากแดดจะมีน้ำหนักที่สูญเสียไป 11.5 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ ก.1) และจากตารางที่ 4.1 แสดงชนิดองค์ประกอบต่างๆ ของการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งเส้นใยที่นำมาใช้ในการศึกษาจัดเป็นของเสียซึ่งคิดเป็นปริมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ของขององค์ประกอบจากการผลิตน้ำมันปาล์ม ดังแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบต่างๆ ของเส้นใยปาล์มจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

ชนิดขององค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ทะลายเปล่า	59
น้ำมัน	18
เส้นใยปาล์ม	13
กะลา	7
ความชื้น	3
รวม	100

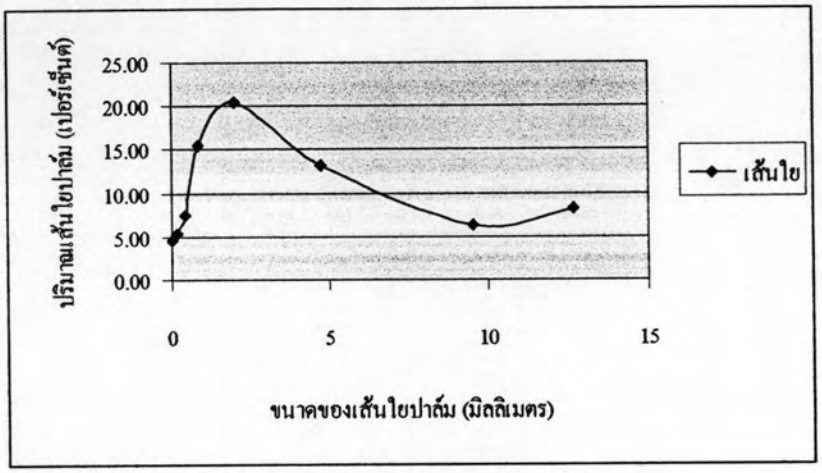
ที่มา: โรงงานผลิตปาล์มน้ำมัน ในจังหวัดตรัง

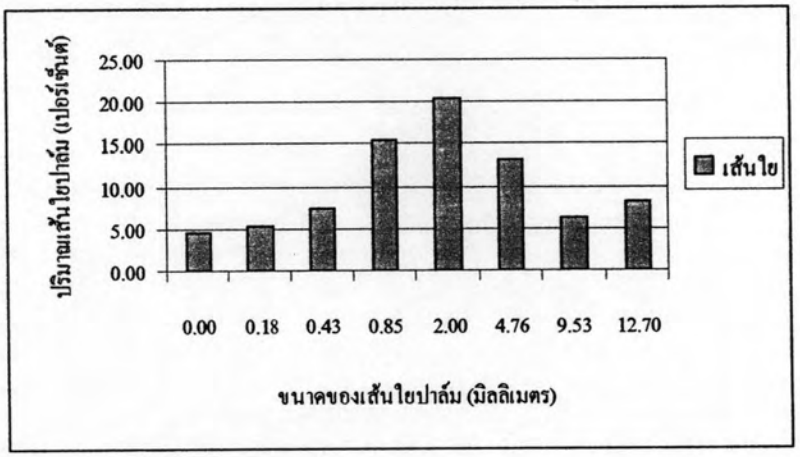
ในการวิจัยนี้ได้นำเส้นใยปาล์มมาแยกขนาดตามขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ (ตารางที่ ก. 2) ทำให้ได้เส้นใยปาล์มที่มีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าเส้นใยปาล์มมีขนาดมากที่สุดในช่วง 2 ถึง

4.76 มิลลิเมตร หรือค้างบนตะแกรงเบอร์ 10 โดยมีปริมาณ 20.37 เปอร์เซ็นต์ของเส้นใยปาล์มทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.1 ทำให้เลือกใช้ขนาดนี้ในการวิจัย

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรง

ขนาดตะแกรง		เส้นใย		เศษเม็ดเปลือกปาล์ม			
เบอร์ตะแกรง	มิลลิเมตร	กรัม	%	กรัม	%	รวม	%
1/2 นิ้ว	12.70	51.80	**8.16**	25.30	**3.98**	77.10	**12.14**
3/8 นิ้ว	9.53	40.20	**6.33**	34.10	**5.37**	74.30	**11.70**
เบอร์ 4	4.76	83.19	**13.10**	62.60	**9.86**	145.79	**22.96**
เบอร์ 10	2.00	129.33	**20.37**	0	**0.00**	129.33	**20.37**
เบอร์ 20	0.85	98.53	**15.52**	0	**0.00**	98.53	**15.52**
เบอร์ 40	0.43	47.83	**7.53**	0	**0.00**	47.83	**7.53**
เบอร์ 80	0.18	33.55	**5.28**	0	**0.00**	33.55	**5.28**
Pan ผ่านเบอร์ 80	0	28.52	**4.49**	0	**0.00**	28.52	**4.49**
รวม		512.95	**80.78**	122	**19.21**	634.95	**100.0**





รูปที่ 4.1 ปริมาณของเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรง

4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ เส้นใยปาล์มที่นำมาปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ ทำให้ได้วัสดุที่ใช้ในการวิจัยออกเป็น 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 4.1 คือ (ก) เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และ (ค) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยลักษณะทางกายภาพที่ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ลักษณะพื้นที่ผิว การหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific density) พื้นที่ผิว ลักษณะโครงสร้าง และ การบวมน้ำ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

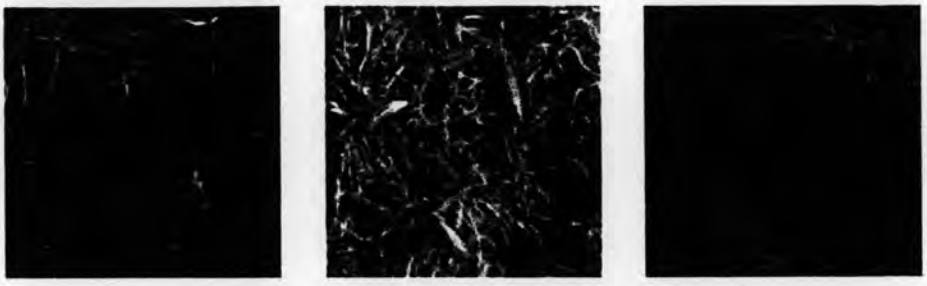
4.2.1.) ลักษณะพื้นที่ผิว

จากการศึกษาพบว่า การปรับสภาพเส้นใยปาล์มโดยใช้สารเคมีนั้นมีผลต่อลักษณะของพื้นที่ผิว รวมถึงลักษณะภายนอกของเส้นใยปาล์มด้วย เช่น ลักษณะของสีที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะสังเกตได้ว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีสีที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม ส่วนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าสีของเส้นใยปาล์มจะมีสีที่อ่อนลงกว่าเส้นใยตามธรรมชาติ และเมื่อนำเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเส้นใยปาล์มปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาศึกษาพื้นที่ผิวของวัสดุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบสแกนที่กำลังขยาย 35, 500, 1000 และ 3500 เท่าดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะเกิดรูพรุนจำนวนมากกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนนั้นจะพบว่าเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ที่สุดและมีความลึกของรูพรุนค่อนข้างมาก ในขณะที่เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะมีรูพรุนและกลุ่มของเส้นใยที่ปิดรูพรุนอยู่ปนกันในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยขนาดของรูพรุนจะไม่ใหญ่และลึกเท่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพนั้นจะพบรูพรุนน้อยมากเมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ โดยพื้นที่ของรูพรุนส่วนมากจะถูกกลุ่มของเส้นใยปิดทับและรูพรุนจะมีความลึกน้อย

เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของพื้นที่ผิวที่กำลังขยาย 3500 เท่า พบว่าพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีลักษณะค่อนข้างเรียบกว่าเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 ง

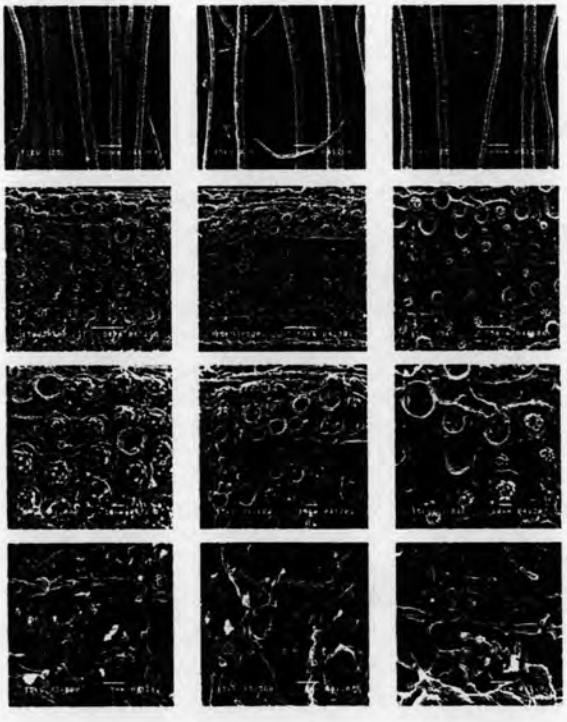
นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของเส้นใยปาล์มที่ปรับภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก คือ จะพบเส้นใยที่มีลักษณะแตกต่างกันเป็นส่วนๆ ส่วนแรกจะเป็นเส้นใยปาล์มที่ขนาดเล็กๆ จำนวนมากเชื่อมต่อกันอยู่ อีกส่วนจะเป็นพื้นผิวที่มีรูพรุน โดยส่วนที่เป็นพื้นผิวนี้จะพบรูขนาดเล็กๆ กระจายตัวกัน ซึ่งจะไม่พบลักษณะรูประเภทนี้รวมทั้งเส้นใยขนาดเล็กในเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ

ในการศึกษาที่กำลังขยาย 35 เท่าพบว่าเส้นใยที่อยู่ในตะแกรงขนาดเดียวกันหรือขนาดใกล้เคียงกันนั้น ยังคงมีความแตกต่างกัน กล่าวคือเส้นใยแต่ละเส้นมีความหนาบางแตกต่างกัน ความสั้นความยาวแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก)



(ก.) (ข.) (ค.)

รูปที่ 4.2 ก.) เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ข.) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ค.) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



(ก.)

(ข.)

(ค.)

(ง.)

(1*) (2*) (3*)

รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ

1*) เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ 2*) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3*) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ก.) กำลังขยาย 35 เท่า ข.) กำลังขยาย 500 เท่า ค.) กำลังขยาย 1000 เท่า ง.) กำลังขยาย 3500 เท่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2.) ความถ่วงจำเพาะ (Specific density)

ผลการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (ในตาราง ข.1) พบว่า การปรับสภาพนั้นส่งผลอย่างมากต่อค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์ม โดยเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุด รองลงมาคือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกและปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากการที่สารเคมีแต่ละประเภทที่ใช้ในการปรับสภาพไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างในเส้นใยปาล์ม ตามลำดับ ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปาล์ม ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	ความถ่วงจำเพาะ	การบวมน้ำ	พื้นที่ผิว ตารางเมตรต่อกรัม	ขนาดรูพรุน อังสตรอม A°
ไม่ปรับสภาพ	1.27	1.09	2.11	49.20
กรดไฮโดรคลอริก	0.29	1.03	1.93	34.01
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.78	1.46	1.61	55.82

3.) พื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ

จากผลการศึกษาพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้วิธี BET ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า การปรับสภาพ ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่เกิดจากการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูปที่ 4.2) โดยปริมาณพื้นที่ผิวของเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณมากที่สุด คือ 2.11 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมาคือ เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1.93 ตารางเมตรต่อกรัม และเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.61 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดรูพรุนมีของเส้นใยมีความแตกต่างกันโดยมีค่าตามลำดับ คือ เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีรูพรุนขนาดเฉลี่ย 55.82 อังสตรอม เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีรูพรุนขนาดเฉลี่ย 49.20 อังสตรอม และ เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก มีรูพรุนขนาดเฉลี่ย 34.01 อังสตรอม

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ

AREA		HCl	NT	H_2O_2
BET SERFACE AREA :	sq. m/g	1.9267	2.1068	1.6114
VOLUME				
SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 1241.4941 A DIAMETER AT P/Po 0.9842 :	cc/g	0.002370	0.001792	0.002249
PORE SIZE				
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY BET) :	A	49.1962	34.0148	55.8168

4.) ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ

จากการวิเคราะห์หาโครงสร้างของเส้นใยลูกปาล์ม โดยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟาเรดสเปคโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infared Spectrometer, FTIR) (รูปที่ ข.1 - ข.4) พบว่า เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีโครงสร้างหลักที่เหมือนกันคือ Alkyl groupหมู่ไฮดรอกซิลหรือส่วนประกอบของอะมิโน (Hydroxy or Amino compound) และ อะลิพาติกแอลกอฮอล์ (Aliphatic Alcohol) ส่วนที่แตกต่างกันคือ อะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic Alcohol) ซึ่งจะพบอยู่ในเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเท่านั้น

จากผลการศึกษาโครงสร้าง พบว่า เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ นั้นจะมีหมู่ไฮดรอกซิล –OH (3,500-3,250 ซม$^{-1}$) หมู่อัลคิล –CH (3,000-2,800 ซม$^{-1}$), -CH_2O- (1,250-1,000 ซม$^{-1}$) และหมู่อัลคีน C=C (1,680-1,560 ซม$^{-1}$)

ในการศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ค่าดูดกลืนแสง (Absorbance) ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5

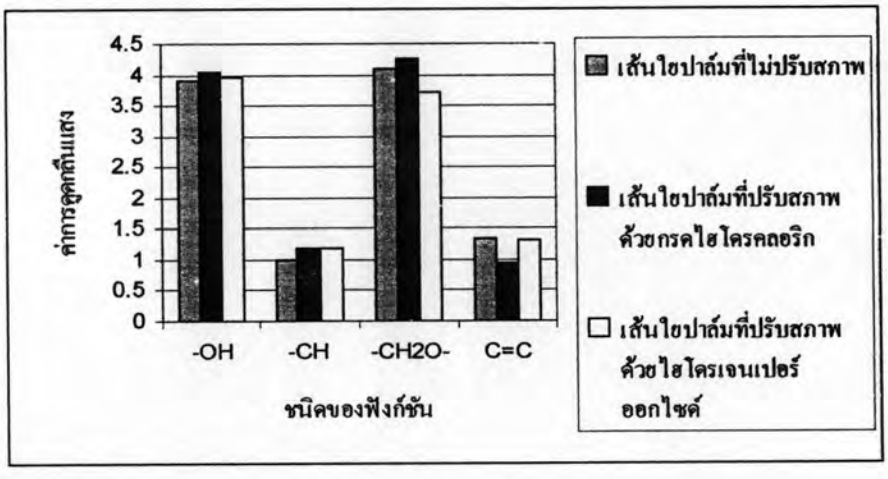
5.) การบวมน้ำของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ

จากตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ ข.3 พบว่าเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าการบวมน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 1.459 รองลงมาคือ เส้นใยที่ไม่ปรับสภาพเท่ากับ1.091 และ

ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 1ตามลำดับ ซึ่งการบวมตัวของเส้นใยนั้น เป็นการเก็บน้ำเข้าไปในตัวของเส้นใย ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ในโครงสร้าง ดังนั้นปริมาณน้ำที่ถูกเก็บไว้หรือการบวมน้ำ จะเพิ่มตามความสามารถการกำจัดโลหะหนัก (ชัชฎาพร องอาจ, 2545)

ตารางที่ 4.5 ค่าดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	ค่า Absorbance ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ			
	-OH	-CH	$-CH_2O-$	C=C
ไม่ปรับสภาพ	3.91	1.00	4.09	1.36
กรดไฮโดรคลอริก	4.05	1.18	4.27	0.95
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	3.95	1.18	3.73	1.32



รูปที่ 4.4 ค่าการดูดซับของหมู่ฟังก์ชันในเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ

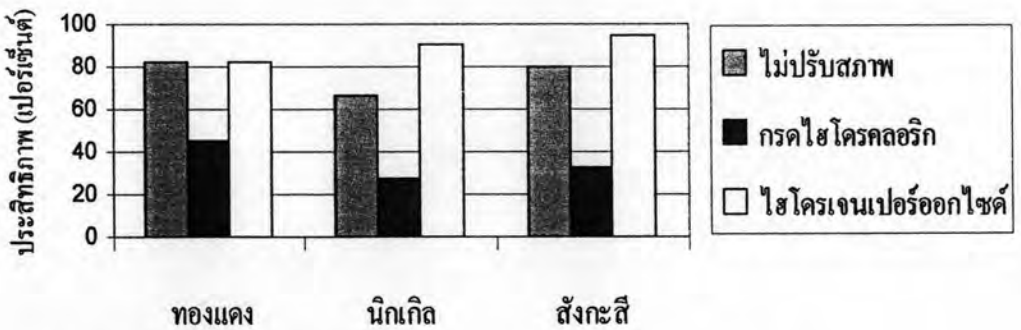
4.3 การศึกษาถึงวิธีการปรับสภาพที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาเพื่อหาวิธีการปรับสภาพที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม (ตารางที่ 4.5) โดยใช้เส้นใยปาล์มขนาด 2.00-4.67 มิลลิเมตรเป็นตัวอย่างในการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ของเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าเท่ากับ 81.94 เปอร์เซ็นต์ 65.88 เปอร์เซ็นต์ และ 80.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก มีค่าเท่ากับ 45.40 เปอร์เซ็นต์ 27.78 เปอร์เซ็นต์ และ 32.43 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ การปรับด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 83.07 เปอร์เซ็นต์ 32.43 เปอร์เซ็นต์ และ 94.46 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น มีความสามารถในการกำจัดโลหะสูง เมื่อเทียบเปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพและเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยพบว่าโลหะหนักที่สามารถกำจัดได้ดีที่สุด คือ ทองแดง สำหรับเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ส่วนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นั้น สามารถกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
ไม่ปรับสภาพ	81.94	65.88	80.07
กรดไฮโดรคลอริก	45.4	27.78	32.43
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	82.58	90.98	94.46



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ

4.4 การศึกษาไอโซเทอมของเส้นใยปาล์ม

จากผลการศึกษาถึงผลของไอโซเทอมของเส้นใยปาล์ม (ภาคผนวก ง.) ซึ่งทำการวิจัยโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการดูดซับ และ ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนัก โดยใช้แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) และ ฟรุนดริชไอโซเทอม (Freundich Isotherm) พบว่า ในการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของเส้นใยนั้นไม่สามารถนำมาหาค่าความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักได้ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้น ทำให้สามารถหาค่าความสามารถสูงสุดใน

การกำจัดโลหะหนักได้ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 - 4.13 โดยเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมีค่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุดคือ กำจัดทองแดงได้ 8.68 มิลลิกรัมต่อกรัม กำจัดนิกเกิลได้ 3.77 มิลลิกรัมต่อกรัม และกำจัดสังกะสีได้ 6.72 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้เนื่องจากในการหาประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มทำให้ทราบว่าเส้นใยที่ไม่ปรับสภาพนั้นถึงมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักน้อยกว่าเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่ก็ยังจัดได้ว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และในการนำเส้นใยปาล์มไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักจริงนั้น หากไม่ต้องทำการปรับสภาพก็ย่อมเป็นผลดีต่อค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ ซึ่งได้ผลคือ สามารถกำจัดทองแดงได้ 2.64 มิลลิกรัมต่อกรัม นิกเกิล 0.09 มิลลิกรัมต่อกรัม และสังกะสี 3.37 มิลลิกรัมต่อกรัม

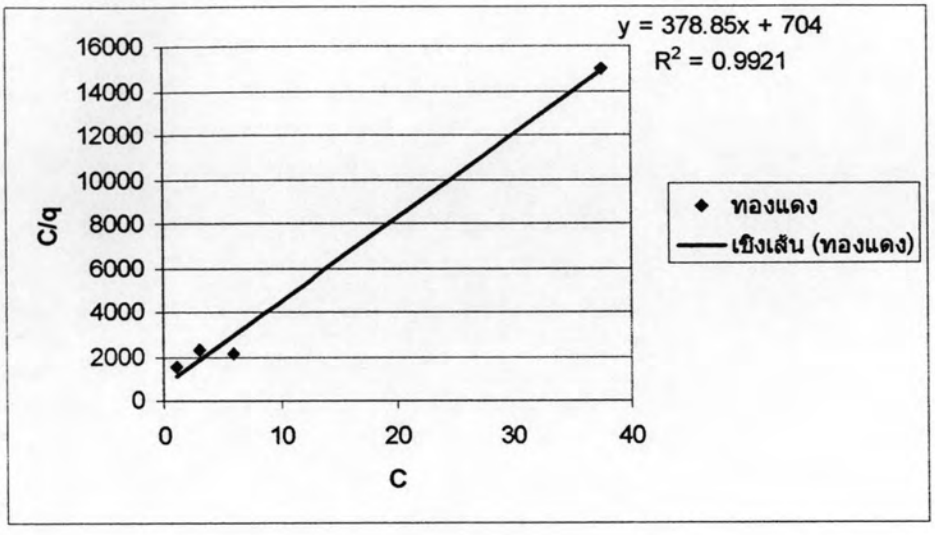
ตารางที่ 4.6 ผลของการทดลองหาไอโซเทอมของเส้นใยปาล์ม

เส้นใยที่ปรับสภาพด้วย	ชนิดโลหะหนัก	ปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใย			ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนัก		
		แลงเมียร์		ฟรุนดริช	แลงเมียร์		ฟรุนดริช
		R^2	Qmax มิลลิกรัมต่อกรัม	R^2	R^2	Qmax มิลลิกรัมต่อกรัม	R^2
ไม่ปรับสภาพ	ทองแดง	0.0835	N.A.[a]	0.2756	0.9921	2.640	0.6581
ไม่ปรับสภาพ	นิกเกิล	0.3958	N.A.[a]	0.0148	0.9585	0.091	0.193
ไม่ปรับสภาพ	สังกะสี	0.7962	N.A.[a]	0.551	0.9939	3.369	0.8225
กรดไฮโดรคลอริก	ทองแดง	0.0976	1.285	0.8019	N.A.[b]	N.A.[b]	N.A.[b]
กรดไฮโดรคลอริก	นิกเกิล	0.324	0.091	0.1041	N.A.[b]	N.A.[b]	N.A.[b]
กรดไฮโดรคลอริก	สังกะสี	0.6542	0.027	0.8249	N.A.[b]	N.A.[b]	N.A.[b]
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ทองแดง	0.4826	0.308	0.9815	0.9825	8.684	0.9379
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	นิกเกิล	0.2083	N.A.[a]	0.4233	0.9998	3.765	0.8733
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	สังกะสี	0.8585	0.144	0.7281	0.9942	6.724	0.9863

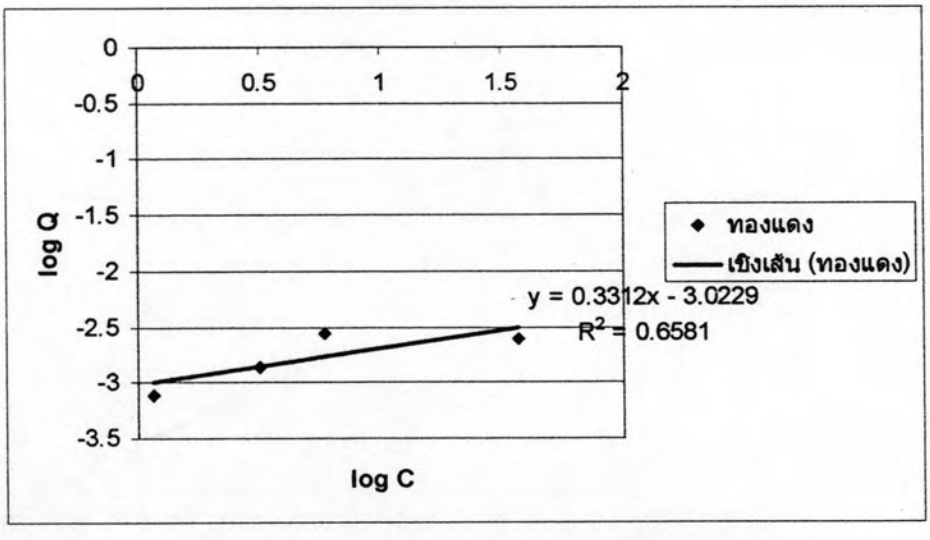
N.A.[a] ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ในการวิเคราะห์ไอโซเทอม

N.A.[b] ไม่ได้ทำการวิเคราะห์เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพต่ำ

แลงเมียร์

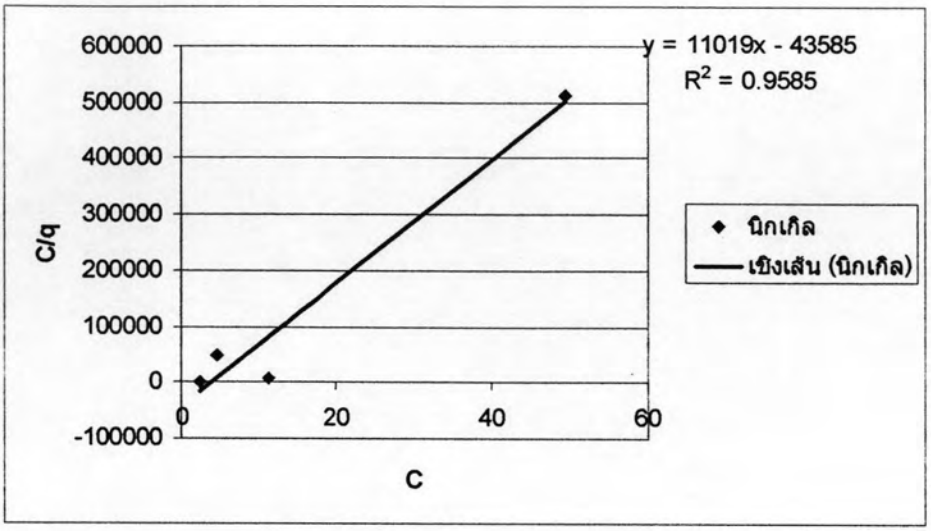


ฟรุนดริช

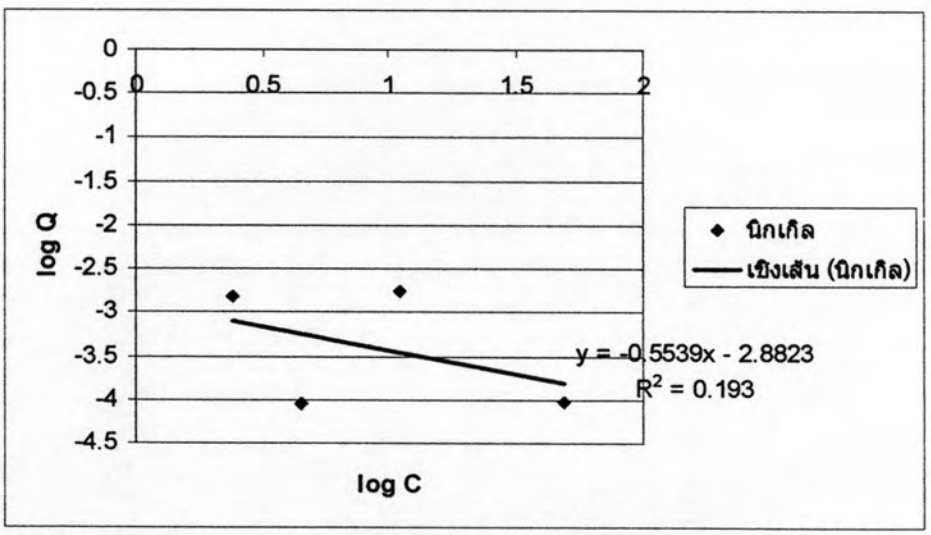


รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริชของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพในการดูดซับทองแดง (แปรเปลี่ยนความเข้มข้น)

แลงเมียร์

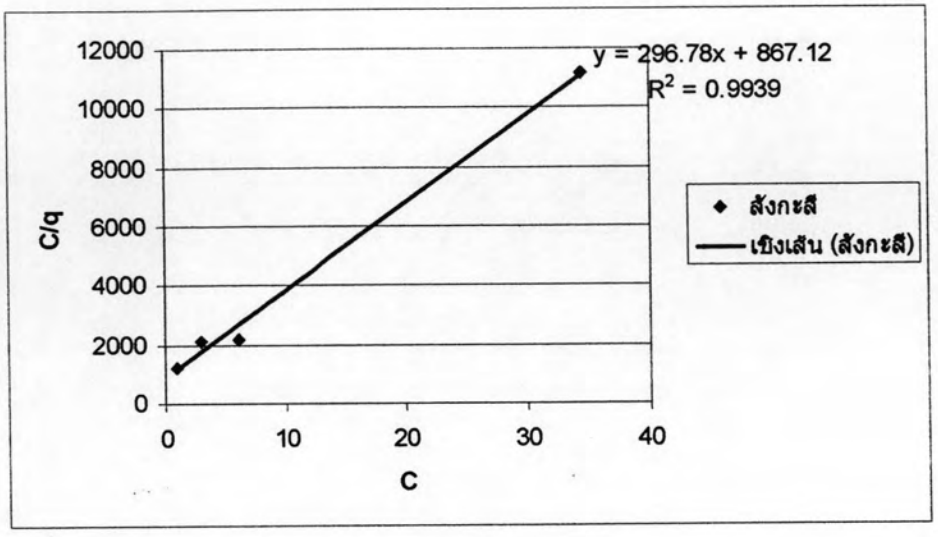


ฟรุนดริช

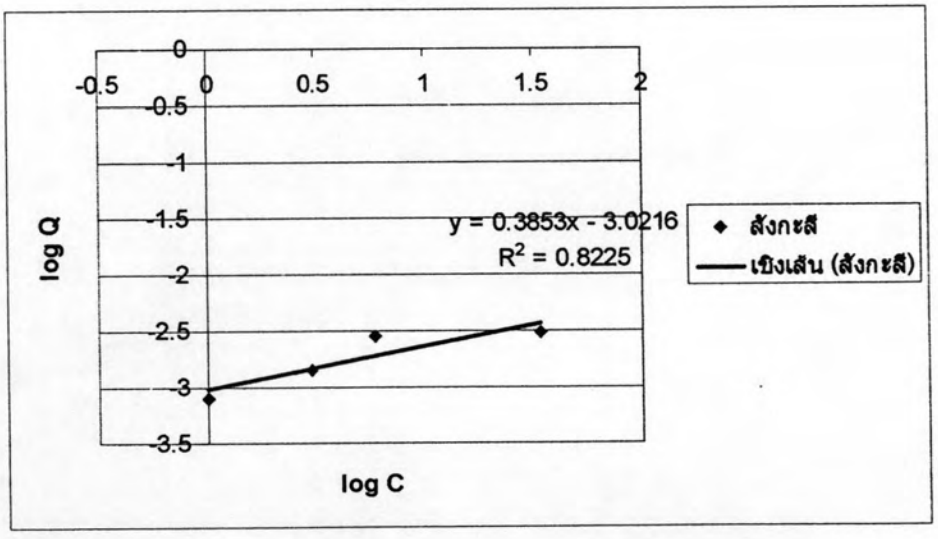


รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริชของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพในการดูดซับนิกเกิล (แปรเปลี่ยนความเข้มข้น)

แลงเมียร์

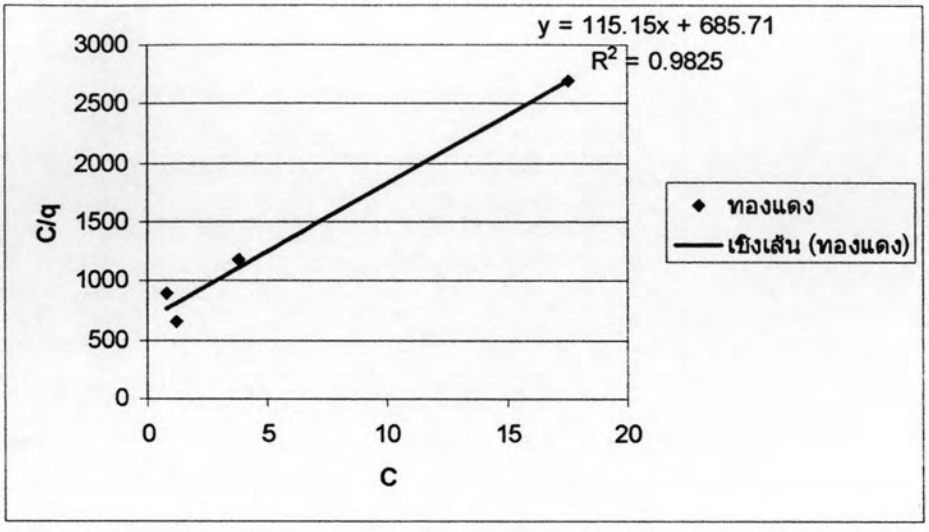


ฟรุนดริช

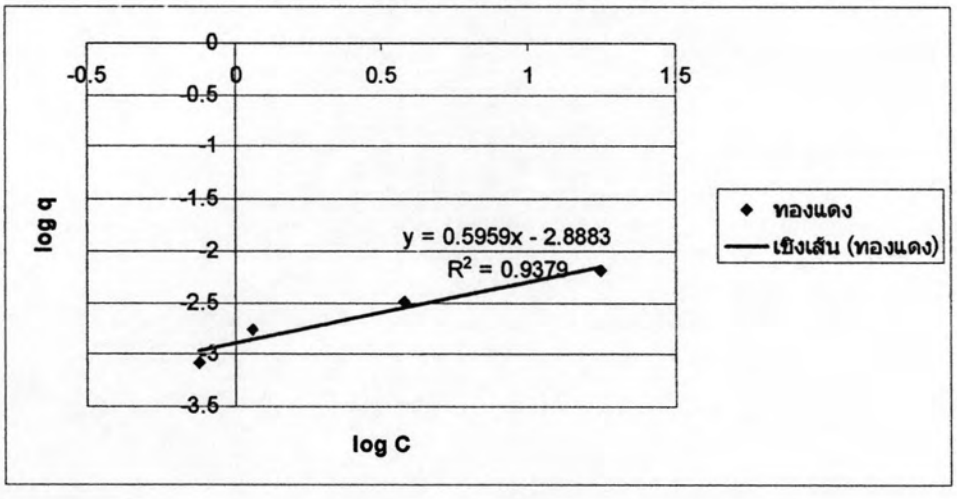


รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริชของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพในการดูดซับสังกะสี (แปรเปลี่ยนความเข้มข้น)

แลงเมียร์

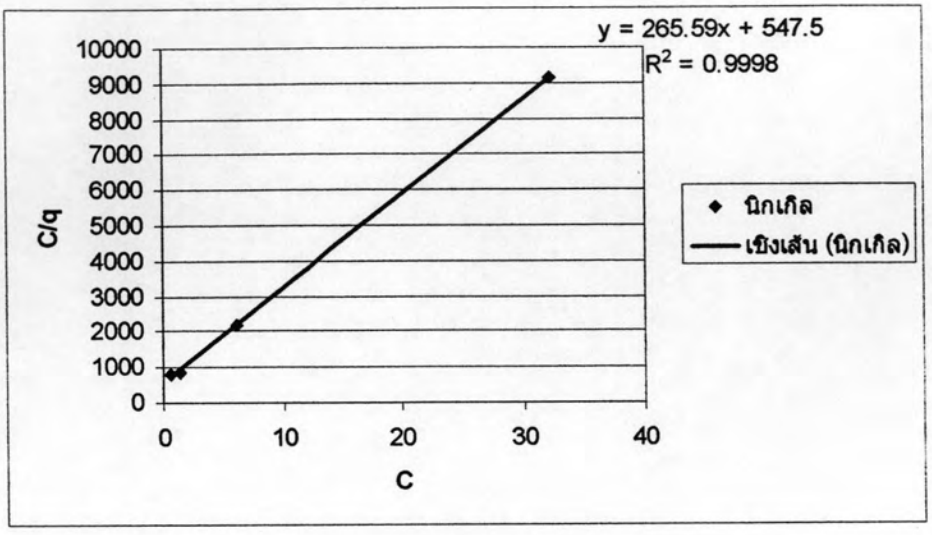


ฟรุนดริช

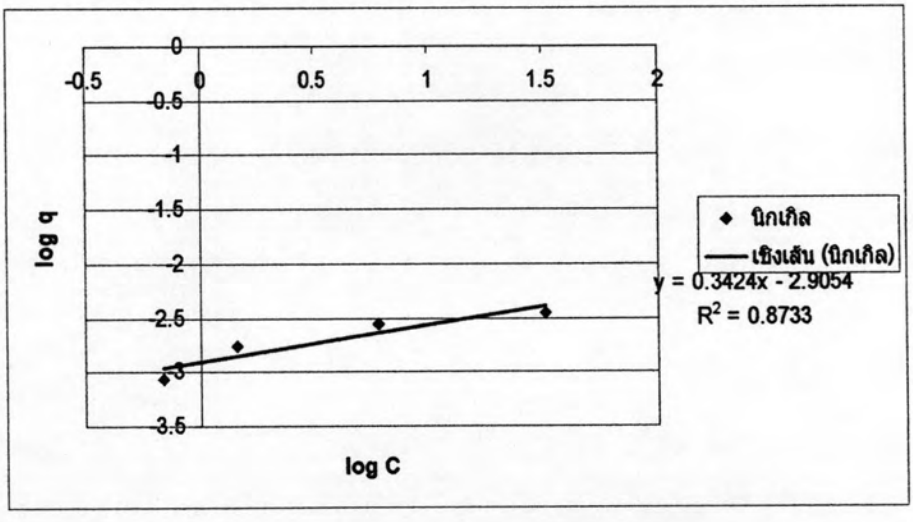


รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริชของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการดูดซับทองแดง (แปรเปลี่ยนความเข้มข้น)

แลงเมียร์

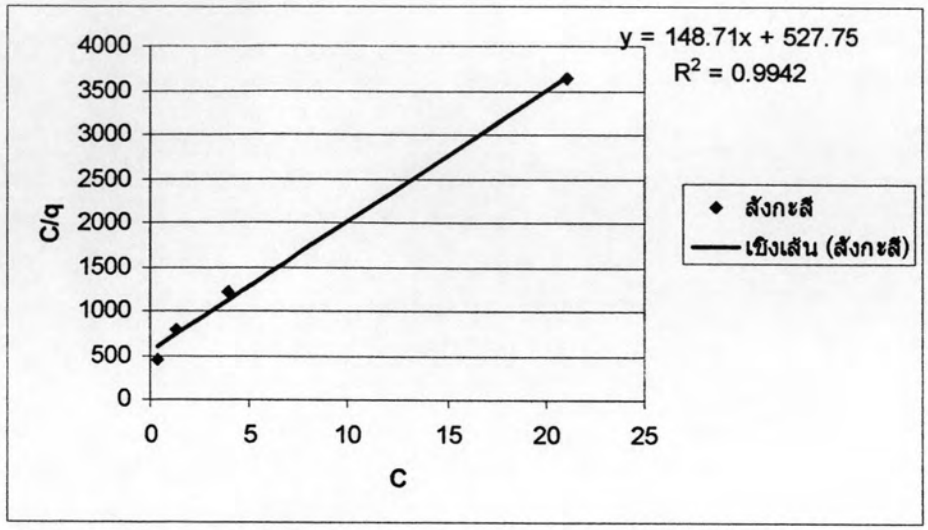


ฟรุนดริช

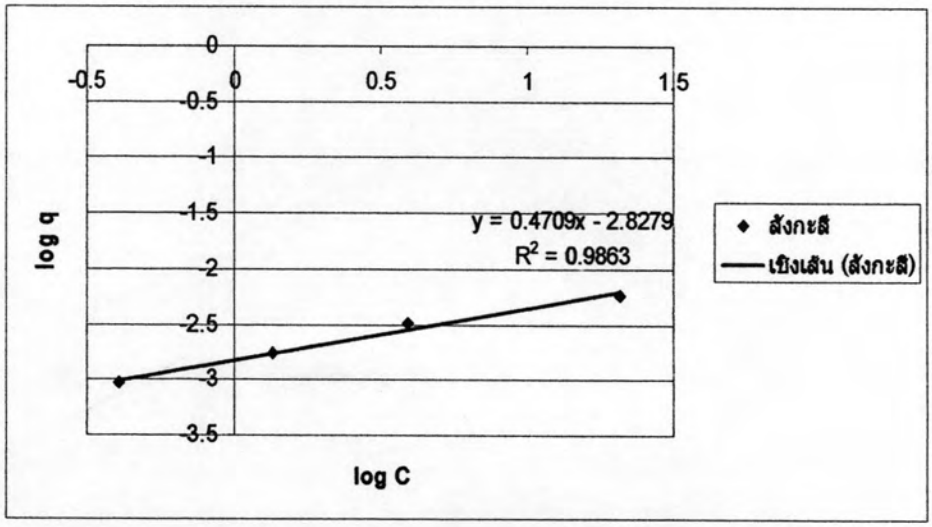


รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริชของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการดูดซับนิกเกิล (แปรเปลี่ยนความเข้มข้น)

แลงเมียร์



ฟรุนดริช



รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดริชของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการดูดซับสังกะสี (แปรเปลี่ยนความเข้มข้น)

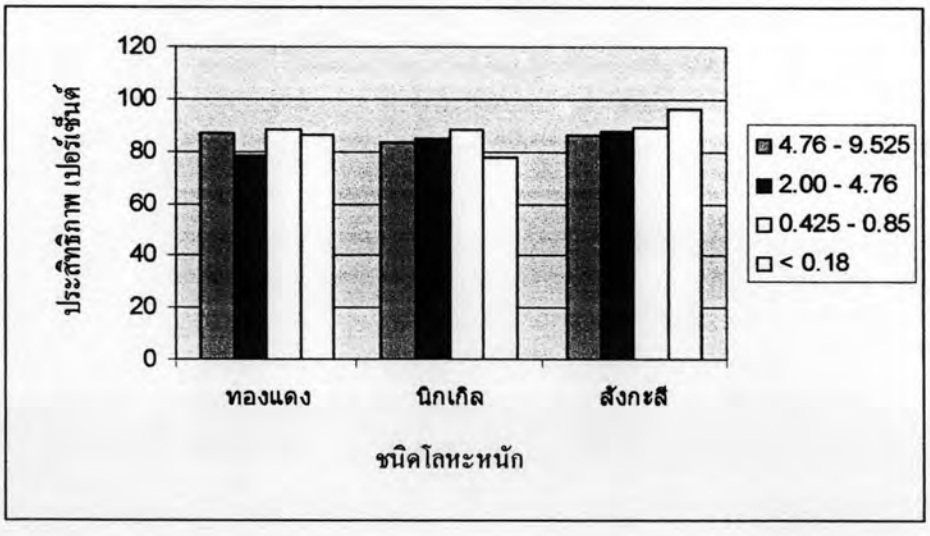
4.5 การศึกษาผลของขนาดที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงได้เลือกเอาวิธีที่เหมาะสมนี้มาใช้ในการทดลอง โดยจากผลการศึกษาของขนาดที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก (ภาคผนวก จ.) พบว่าขนาดของเส้นใยมีผลต่อการกำจัดโลหะหนักไม่มากนัก โดยจะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 78-97 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.12

เมื่อพิจารณาถึงขนาดที่นำมาใช้ในงานวิจัย ซึ่งจัดว่าเป็นขนาดที่มีปริมาณมากที่สุดดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าขนาดที่นำมาใช้นั้นถึงแม้ให้ประสิทธิภาพไม่สูงที่สุดแต่ก็อยู่ในช่วงที่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.7 ผลของขนาดของเส้นใยปาล์มที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

ขนาดของเส้นใยปาล์ม มิลลิเมตร	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
4.76 - 9.525	86.98	83.14	86.39
2.00 - 4.76	78.14	84.46	87.58
0.425 - 0.85	88.34	88.58	88.90
< 0.18	86.04	77.88	96.57



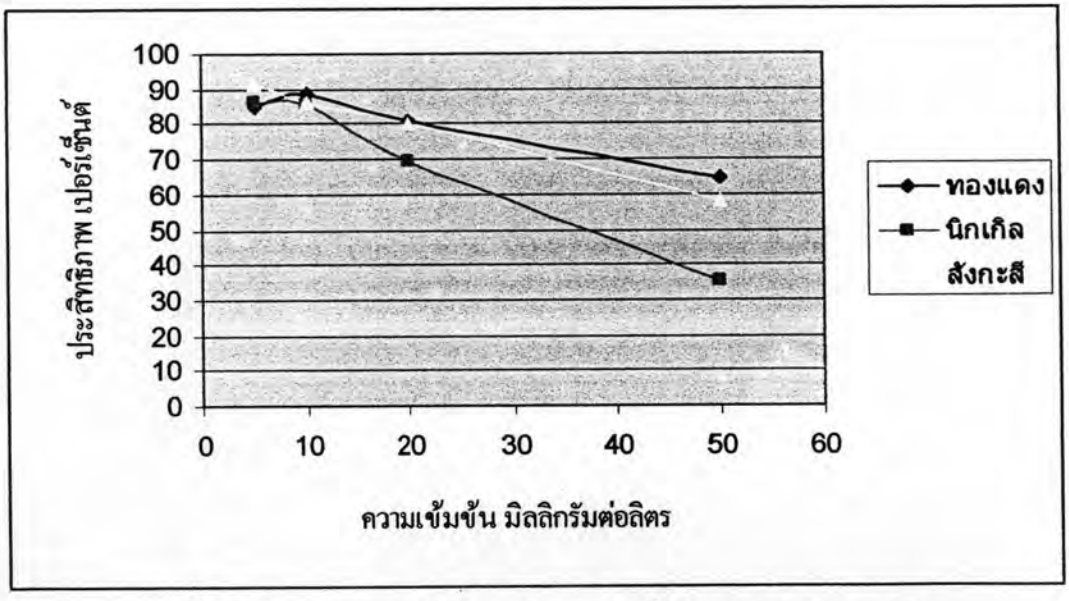
รูปที่ 4.12 ผลของขนาดของเส้นใยปาล์มที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

4.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก (ภาคผนวก ฉ.) พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักมีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะได้ดีที่สุดคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก

ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	84.86	86.32	91.86
10	88.45	85.48	86.36
20	80.95	69.58	80.42
50	64.95	35.40	57.88



รูปที่ 4.13 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก

4.7 การประมาณค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการศึกษาพบว่า วิธีการที่ดีที่สุดในการกำจัดโลหะหนักคือ นำเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นทำให้ราคาของสารปรับสภาพจึงไม่สูง โดยพบว่าค่าใช้จ่ายต่อ 100 กรัมเส้นใยปาล์มที่ทำการปรับสภาพ

จะใช้ค่าใช้จ่ายประมาณ 2.00 บาท เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะใช้ค่าใช้จ่ายประมาณ 94.00 บาท และเส้นใยที่ไม่ปรับสภาพจะใช้ค่าใช้จ่ายประมาณ 7.50 บาท

ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 400 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการกำจัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร เส้นใยปาล์มที่ทำการปรับสภาพ จะใช้ค่าใช้จ่ายประมาณ 100 บาท เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะใช้ค่าใช้จ่ายประมาณ 4700 บาท และเส้นใยที่ไม่ปรับสภาพจะใช้ค่าใช้จ่ายประมาณ 375 บาท ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และแสดงรายการคำนวณค่าใช้จ่ายใน ภาคผนวก ช.

ตารางที่ 4.9 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย (คิดเฉพาะค่าวัสดุในการปรับสภาพ)

เส้นใยที่ปรับสภาพด้วย	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียต่อลูกบาศก์เมตร (บาท)
ไม่ปรับสภาพ	100
กรดไฮโดรคลอริก	4700
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	375

4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มกับเศษวัสดุในงานวิจัยอื่นๆ

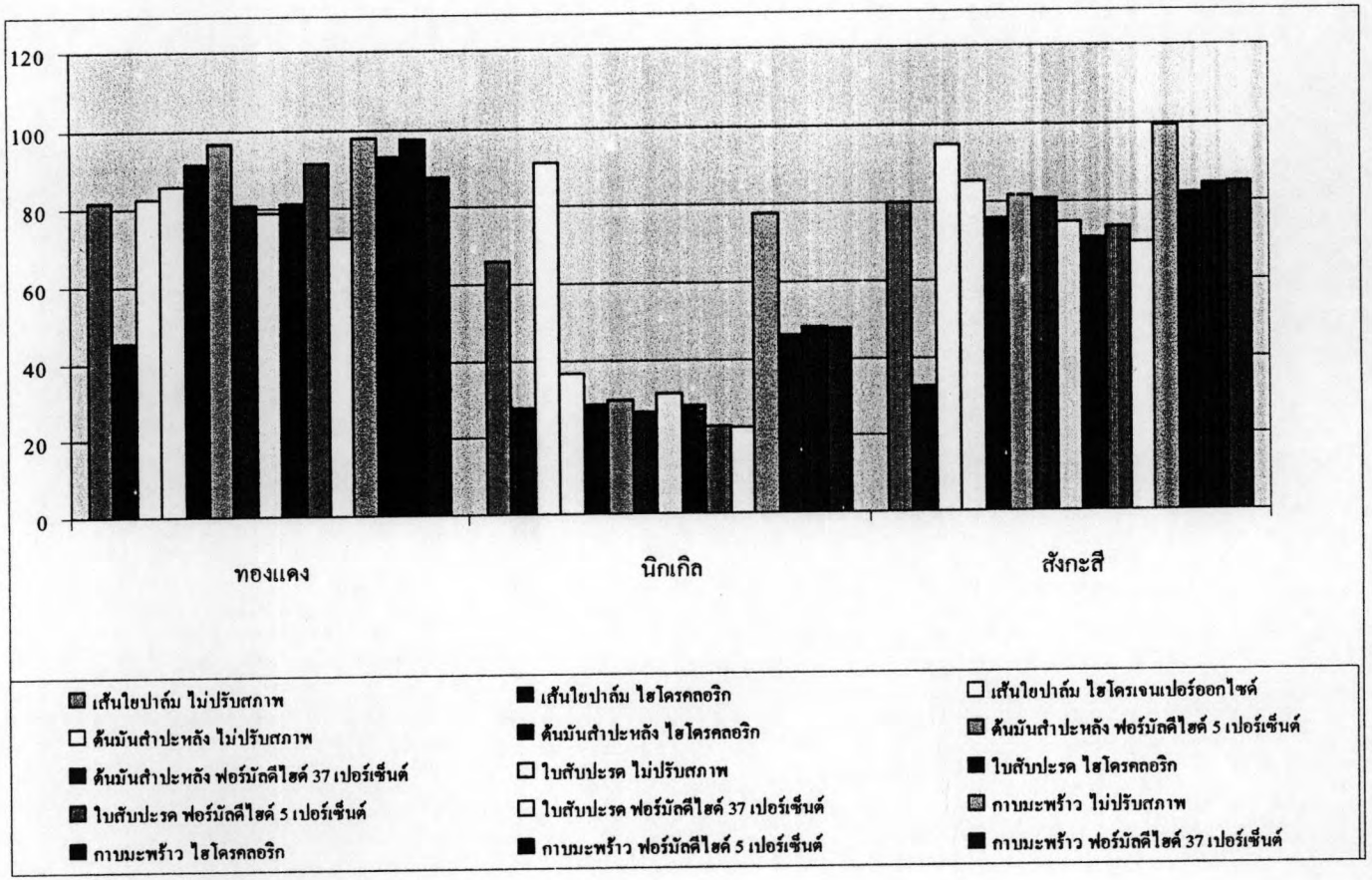
จากการศึกษาข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักหลายชิ้นแต่ที่เลือกมาเปรียบเทียบนั้นเป็นงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัยเดียวกัน คือใช้ต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์ และฟอร์มัลดีไฮด์ 37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่า ในการกำจัดทองแดงนั้นการปรับสภาพที่ดีที่สุดของแต่ละวัสดุนั้นเป็นดังนี้คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพ 82.58 เปอร์เซ็นต์ ต้นมันสำปะหลังที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพ 96.57 เปอร์เซ็นต์ ใบสับปะรดที่ปรับภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพ 91.30 เปอร์เซ็นต์ และกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพ 97.25 เปอร์เซ็นต์ ในการกำจัดนิกเกิลนั้นการปรับสภาพที่ดีที่สุดของแต่ละวัสดุนั้นเป็นดังนี้คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพ 90.98 เปอร์เซ็นต์ ต้นมันสำปะหลังไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพ 36.81 เปอร์เซ็นต์ ใบสับปะรดที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพ 28.08 เปอร์เซ็นต์ และกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพ 48.39 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสังกะสีนั้นการปรับสภาพที่ดีที่สุดของแต่ละวัสดุนั้นเป็นดังนี้คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพ 94.46 เปอร์เซ็นต์ ต้นมันสำปะหลัง

ที่ไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพ 85.27 เปอร์เซ็นต์ ใบสับปะรดที่ไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพ 75.04 เปอร์เซ็นต์ และกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพ 84.85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพกับวัสดุธรรมชาติอื่นๆ

ชนิดของวัสดุ	วัสดุมีการปรับสภาพด้วย	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
		ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
เส้นใยปาล์ม	ไม่ปรับสภาพ	81.94	65.88	80.07
	ไฮโดรคลอริก	45.4	27.78	32.43
	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	82.58	90.98	94.46
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	85.58	36.81	85.27
	ไฮโดรคลอริก	91.53	28.65	76.16
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์	96.57	29.79	81.77
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 เปอร์เซ็นต์	81.01	26.57	80.79
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	78.95	31.31	75.04
	ไฮโดรคลอริก	81.46	28.08	70.97
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์	91.30	22.96	73.49
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 เปอร์เซ็นต์	72.31	22.39	69.71
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	97.71	77.80	99.44
	ไฮโดรคลอริก	92.91	46.49	82.19
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์	97.25	48.39	84.43
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 เปอร์เซ็นต์	87.64	48.01	84.85

ที่มา: ชัชฎาพร องอาจ, 2545



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ เปรียบเทียบกับวัสดุธรรมชาติอื่นๆ