



66965



รายงานการวิจัย

การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

Adsorption of heavy metal solution on rice husk ash (RHA)
and rubber wood ash (RWA)

มาหามะสุไฮมี มะแซ

Mahamasuhaimi Masae

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

Surasit Rawangwong

วิทยา ศิริคุณ

Witthaya Sririkun

พงศธร ชันนา

Pongsatorn Kanna

อนนท์ สังข์แก้ว

Anon Sungkeaw

674,834

ม 291
2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

12/10/2556

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

การนำมาใช้ประโยชน์ของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรเป็นตัวดูดซับสารละลายโลหะหนักคือ นิกเกิล ทองแดงและเหล็กไอออนได้ทำการศึกษาความเร็วรอบในการกวน ปริมาณเถ้าที่ใช้ เวลาในการดูดซับ ซึ่งเถ้าที่ได้ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF การกระจายตัวของอนุภาคและพื้นที่ผิววิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบหาขนาดอนุภาค เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักดังกล่าววิเคราะห์ด้วยเครื่อง (ICP-AES)

จากการศึกษาได้ผลการทดลองว่าเถ้าไม้ยางพารามีการดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ดีกว่าเถ้าแกลบซึ่งอุณหภูมิในการเผาเถ้าที่เหมาะสมคือ 500 องศาเซลเซียส สำหรับปริมาณของเถ้าที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 10 กรัม/ลิตร เวลาที่เหมาะสมคือ 20 นาที (ดูดซับถึง 89-99 เปอร์เซ็นต์สำหรับเถ้าไม้ยางพารา) ที่ความเร็วในการกวน 400 รอบต่อนาที แต่สำหรับสารละลายเหล็กนั้นมีแนวโน้มที่จะต้องใช้เวลาในการดูดซับที่มากกว่า 20 นาที

Abstract

Utilizations of rice husk ash (RHA) and rubber wood ash (RWA), an agricultural waste, as an adsorbent for the adsorption of Ni(II), Cu(II) and Iron (III) ions from aqueous solution was studied. Studies were carried out as a function of rotating speed, amount of dosage and contact times. These raw material were calcined at the temperatures of 300 and 500°C for 1 h. Chemical composition of RHA and RWA were characterized by X-ray fluorescent (XRF). Particle size and specific surface area were observed by using Beckman Coulter. The RHA and RWA were investigated in terms of morphology with scanning electron microscopy (SEM). Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-AES) was used for the analysis of Ni(II), Cu(II) and Fe(III) in aqueous solution.

The RWA is better adsorbing than RHA. The optimum temperature is 500°C. Optimum conditions for Ni(II) and Cu(II) ions removal were found to be adsorbent dosage 10 g/L, equilibrium time 20 minutes (89-99% removal for RWA) and rotating speed 400 rpm. For Fe(III) was found that tends to be high contact times.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและมิได้ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เล็ก สีคง ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการนาโนเทคโนโลยีเพื่อทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณพีรวัส กองสงและคุณพัชรี เพิ่มพูน ที่คอยให้ความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

มาหามะสุไฮมี มะแซ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการรูป	(9)
สัญลักษณ์และตัวย่อ	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐานและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	4
1.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	19
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	23
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	23
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	23
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย	24
2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	24
2.2 ขั้นตอนการวิจัย	26
3. ผลการศึกษา	27
3.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	27
3.2 ผลความหนาแน่นจริง	28
3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง	28
3.4 ผลการวิเคราะห์วัตถุกับด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราด	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ผลการวิเคราะห์หัตถุติบด้วย X-ray fluorescent (XRF)	29
3.6 การดูดซับสารละลาย	30
3.7 การวิเคราะห์เฟสทางเคมีของถ้ำไม้ยางพารา	36
3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของถ้ำไม้ยางพารา	
4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผล	39
4.2 ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	41
ภาคผนวก	44
ภาคผนวก ก	45
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	53
ประวัติผู้เขียน	55

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ปริมาณเถ้าแกลบในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2551-2555	2
1.2 วัตถุดิบหลักที่ใช้เถ้าไม้ยางพารา	4
1.3 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	18
1.4 แร่ประกอบของเถ้าไม้ยางพารา ด้วย XRD	20
1.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	21
3.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผงวัตถุดิบ	27
3.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดผงวัตถุดิบ	28
3.3 ความหนาแน่นจริง	28
3.4 ค่า pH ของสารละลาย	29
3.5 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	30
3.6 แร่ประกอบของเถ้าไม้ยางพารา ด้วย XRD	38

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการนำไปประยุกต์ใช้ของถ้ำเกลบในงานด้านต่างๆ	3
1.2 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาอนุภาคตัวดูดซับ	7
1.3 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยที่ขึ้นอยู่กับขนาด	8
1.4 แสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในอนุภาคตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์	9
1.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	12
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	14
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	15
1.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e \left(\log \frac{X}{m} \right)$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟลอยด์ลิช	16
1.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{n(P^o - P)}$ และ $\left(\frac{P}{P^o} \right)$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของบรูนาเออร์ แอมเมทท์และเทลเลอร์	17
1.10 (a) รูปถ้ำเกลบ (b) ความหนาแน่นของซิลิกาที่มีอยู่ในถ้ำเกลบ	20
2.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	25
2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	25
3.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ	27
3.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ก) ถ้ำเกลบ และ ข) ถ้ำไม้ยางพารา ด้วยกำลังขยาย 500 1,000 และ 3,500 เท่า ตามลำดับ	29
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำเกลบกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับ	31
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำไม้ยางพารากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับ	32
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ้ำเกลบ	33

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถาไม้ยางพารา	33
3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถาเกลบ	34
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถาไม้ยางพารา	35
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถาเกลบ	36
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถาไม้ยางพารา	36
3.11	ผลวิเคราะห์แร่ประกอบในวัตถุดิบเถาไม้ยางพาราด้วย XRD	37
3.12	ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของวัตถุดิบเถาไม้ยางพารา (Thermogravimetry Analyzer and Differential Thermal Analyzer)	38

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

RHA	Rice husk ash
RWA	Rubber wood ash
C ₀	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก
C	ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่สมดุล
XRD	X-ray diffraction
XRF	X-ray fluorescent
SEM	Scanning Electron Microscope
Ni	สารละลายนิกเกิลไอออน
Cu	สารละลายทองแดงไอออน
Fe	สารละลายเหล็กไอออน
LOI	Loss on ignition
TGA	Thermogravimetric Analysis
DTA	Differential Thermal Analyzer
ppm	Part per million
%Removal	เปอร์เซ็นต์การกำจัด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำด้านเรื่อง

ปัจจุบันนี้ แหล่งน้ำซึ่งเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยแร่ธาตุอาหาร และเกี่ยวข้องกับความเป็นอยู่ในชีวิตประจำวันทั้งในด้านครัวเรือน การเกษตร การประมง และโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ปล่อยน้ำเสียลงในแม่น้ำลำคลอง ทำให้มีสภาพเน่าเสีย ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดมลภาวะทางน้ำจึงมีกระบวนการป้องกันและบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

โลหะหนักในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของตะกอนที่ไม่เคลื่อนที่และในสินแร่ นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ กระบวนการอุตสาหกรรมทำให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมบนพื้นโลกและในน้ำ โลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ มลพิษที่เกิดจากการปลดปล่อยของโลหะหนักหากไม่ได้รับการบำบัดที่เหมาะสมแล้ว จะมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอย่างมีนัยสำคัญจากการสะสมในห่วงโซ่อาหาร ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำที่ปนเปื้อน การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียทำได้โดยวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ ก่อให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและเป็นปัญหาสำคัญของโลกในปัจจุบัน โลหะหนักเข้าไปสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง แหล่งที่มาหลักๆ ของโลหะหนัก ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม การใช้สารกำจัดศัตรูพืช การทำเหมืองแร่สารเคมีจากอุตสาหกรรมเกษตร น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน และวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานกระดาษและโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป ปัจจุบันปริมาณของเสียจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นจึงมีการใช้ประโยชน์กากตะกอนของเสียที่บำบัดแล้ว อย่างไรก็ตาม ต้องมีความระมัดระวังในการใช้เนื่องจากโลหะหนักอาจสะสมอยู่ในกากตะกอนเป็นจำนวนมาก กากตะกอนน้ำเสียถูกนำมาใช้มากขึ้นในการเกษตรเพื่อเพิ่มธาตุอาหารพืชและอินทรีย์วัตถุให้กับดิน กากตะกอนน้ำเสียมักมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม แต่ในขณะเดียวกันก็มีสารที่เป็นพิษต่อสุขภาพด้วย เช่น โลหะหนักและจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโทษ ดังนั้นการใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืช ในขณะเดียวกันก็จะเพิ่มโลหะหนักลงไปในดินด้วยซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาของ (Teixeira, ST., Jose de Melo, W., and Silva, ET., 2005) พบว่า การใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อปรับสภาพดินที่เสื่อมแม้ว่ากากตะกอนจะมีโลหะหนัก เช่น นิกเกิล เหล็ก ทองแดง แมงกานีส สังกะสี ฯลฯ อยู่ในปริมาณน้อย

แต่โลหะหนักเหล่านี้ก็อยู่ในสภาพที่เคลื่อนที่ได้ จึงมีแนวโน้มที่จะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมและการสะสมโลหะหนักลงในดิน ทำให้สภาพดินเสื่อม ผลผลิตพืชที่เป็นอาหารมีคุณภาพไม่เหมาะสมต่อการบริโภคโลหะหนักที่พบในพืชขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและการเคลื่อนย้ายในดิน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน (Antanaitis, D., and Antanaitis, A., 2004) การใช้สารดูดซับต่างๆ เพื่อให้สารเคมีที่ปล่อยออกมาจากแหล่งการผลิตเพื่อให้มีความเจือจางของสารละลายนั้นจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถบำบัดสารละลายโลหะหนักได้

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรหลากหลายชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย เศษไม้ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา กะลาใบมะพร้าว และกากใยปาล์ม เป็นต้น จากการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมปัจจุบัน พบว่ามีปริมาณมากกว่า 29 ล้านตัน (<http://www.enviromnet.in.th>) ซึ่งในภาคใต้มีแหล่งทรัพยากรชีวมวลเกษตรระยะยาว (ยางพาราและแกลบ) ซึ่งถือว่าเป็นชีวมวลเพื่อพลังงานที่มีความมั่นคงที่สุด ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวที่ถือเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ผลผลิตข้าวเมื่อนำมาผ่านกระบวนการสีจะได้เมล็ดข้าวกับเปลือกข้าวหรือแกลบ โดยแกลบจะมีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2% ของข้าวเปลือก และการใช้ประโยชน์จากแกลบวิธีหนึ่งคือ การใช้เป็นเชื้อเพลิง เพราะแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3,880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ขณะที่ค่าความร้อนเฉลี่ยของไม้พืชมักมีค่า 4,475 กิโลแคลอรี/กิโลกรัมซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามสิ่งที่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างการเผาแกลบกับไม้พืชมคือปริมาณเถ้า โดยแกลบจะให้เถ้าออกมาประมาณ 17.4% มากกว่าเถ้าจากไม้พืชมถึง 7 เท่า (ตารางที่ 1) โดยทั่วไปเถ้าที่หลงเหลือจากการเผาวัสดุไม้ใช้สิ่งที่น่าสนใจนัก ยกเว้นเถ้าแกลบ เพราะนักวิทยาศาสตร์พบว่า ในเถ้าแกลบมีซิลิกา (silica, SiO₂) เป็นองค์ประกอบประมาณ 70-90% และเถ้าแกลบมีความพรุน (porosity) มาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับ (absorbent) ดีอีกทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนด้วย (บุญรักษ์, 2552) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น การบำบัดน้ำเสีย การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ อะไหล่รถยนต์ เป็นต้น (รูปที่ 1)

ตารางที่ 1.1 ปริมาณเถ้าแกลบในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2551-2555

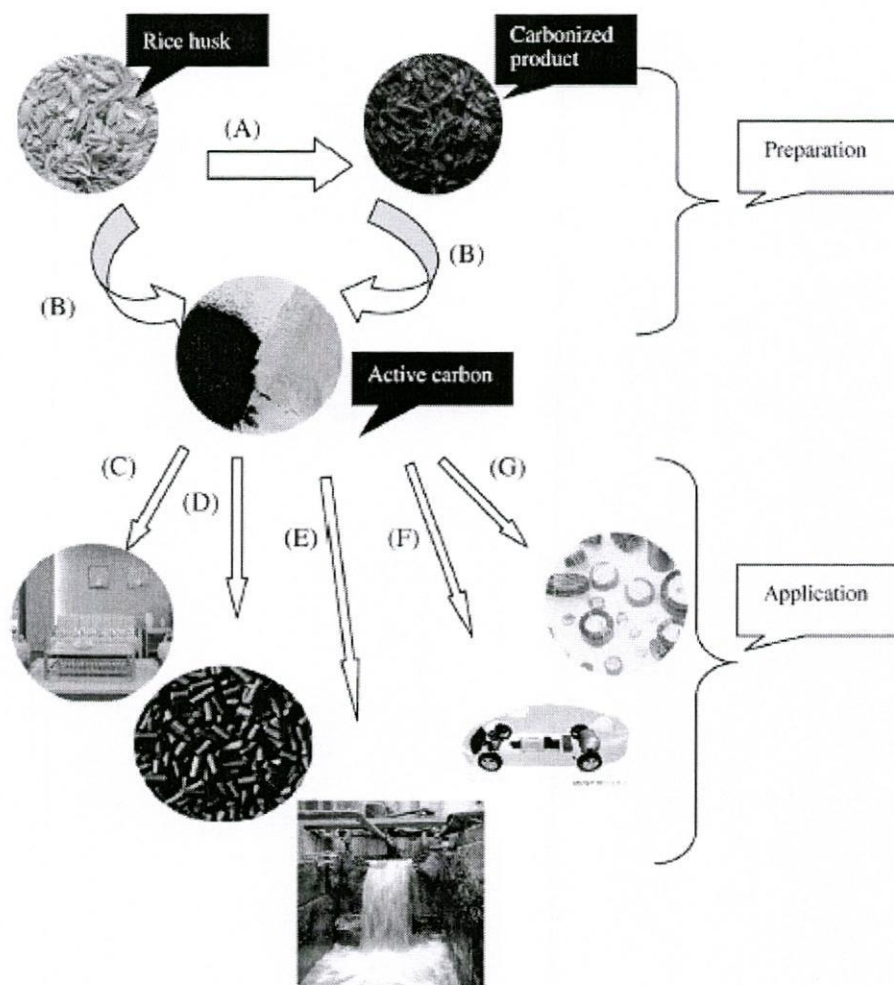
ปริมาณเถ้าแกลบ (ตัน)				
2551	2552	2553	2554	2555*
586,850	503,714	530,360	586,850	25,774

* ปริมาณเถ้าแกลบในปี 2555 ประจำเดือนมกราคมเท่านั้น

ที่มา: สภาหอการค้าแห่งประเทศไทย และ สำนักมาตรฐานสินค้านำเข้าส่งออก

นอกจากนี้อุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้ก็เช่นกัน มีส่วนเพิ่มวัตถุดิบไม้้อย่างยั่งยืน มีผลทางเศรษฐกิจเป็นอย่างยิ่งในประเทศกลุ่มอาเซียน ปัจจุบันไทย มีเนื้อที่ปลูกยางประมาณ 12.2

ล้านไร่ เป็นประเทศผู้ผลิตยางพารา อันดับ 1 ประมาณ 2.3 ล้านตัน นอกจากปริมาณน้ำยางแล้ว กำลังผลิตไม้ท่อนเพื่อป้อนสู่โรงงานอุตสาหกรรมไม้ หลังจากต้นยางแก่ให้ผลผลิตต่ำ จะต้องโค่น เนื้อที่ปลูกทดแทนปี ละ 230,000 ไร่มีปริมาณไม้ถึง 5.1 ล้านตารางเมตร ปัจจุบันไม้แปรรูปยางพารา มีบทบาทสำคัญ เป็นวัตถุดิบของ อุตสาหกรรมไม้ของประเทศ ไม้ยางพาราเป็นผลพลอยได้ของการ ปลูกยาง สามารถลดการบุกรุกการทำลายพื้นที่ป่าอย่างได้ผลดียิ่ง ปริมาตรไม้ยางพารา ส่วนยาง 1 ไร่ โดยเฉลี่ยจะได้ไม้ยางพาราท่อนซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ ได้จำนวน 40 ลูกบาศก์ เมตร (สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร 16 กุมภาพันธ์ 2542) ซึ่งเศษไม้ยางพารานำมา เป็น เชื้อเพลิงจะได้เป็นถ่านประมาณ 4% (ตารางที่ 2)



รูปที่ 1.1 แสดงการนำไปประยุกต์ใช้ของถ่านแกลบในงานด้านต่างๆ (ที่มา: Yue, C. et al. 2011)

ตารางที่ 1.2 วัตถุดิบหลักที่ให้เถ้าไม้ยางพารา

ประเภทไม้	ปริมาณไม้	
	ปริมาตร ล้าน ลบ.ม.	น้ำหนัก ล้านตัน
ปึกไม้	2.10	1.365
ขี้เลื่อย	0.90	0.585
ไม้พื้นโรงรมควั่นยาง	0.15	0.098

หมายเหตุ: ปริมาณเถ้าไม้ยางพารา 819,200 ตันต่อปี ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

งานวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ได้แก่ เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราเป็นตัวดูดซับหรือกำจัดสารละลายโลหะหนักเพื่อให้มีความเจือจางมากที่สุดก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหรือเข้าสู่ระบบบำบัดต่อไป

1.2. ทฤษฎี สมมติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (absorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวดำ (low surface energy) จะถูกดูดซับได้ดี ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงกว่า (higher surface free energy) จะไม่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของตัวดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (surface tension) และพื้นที่ผิว (surface area) ดังสมการ (1)

$$G_{sf} = \gamma A \quad (1)$$

เมื่อ G_{sf} เป็นพลังงานอิสระที่ผิว

γ เป็นแรงตึงผิว

A เป็นพื้นที่ผิว

เมื่อแรงตึงผิวหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานซึ่งจะเป็น ΔS_{sf} แรงตึงผิวของของเหลว คือแรงตึงต่อหน่วยความยาว (ตั้งฉากกับแรง) ที่ถูกแรงนี้กระทำปกติแรงตึงผิวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ 75.6×10^{-3} ต่อนิวตันเมตร และที่ 20 องศาเซลเซียส น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ 72.8×10^{-3} ต่อนิวตันเมตร ความตึงผิวของของเหลวเป็นค่าเฉพาะของของเหลวชนิดนั้น เช่นแรงตึงผิวของปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส มีแรงตึงผิวเท่ากับ 456×10^{-3} ต่อนิวตันเมตร ซึ่งแตกต่างจากค่า

ความตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน การดูดซับจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็น โมเลกุลของแก๊สหรือตัวทำละลายในสารละลาย การดูดซับของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสภาวะแก๊สกับโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง หรือ เกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของตัวละลายในสารละลายกับโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงดูด โมเลกุล หรือคอลลอยด์ซึ่งอาจอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะและติดบนผิว ถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่างๆทั้ง 3 สถานะ ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง ในกรณีการดูดซับได้กำหนดนิยามที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

Adsorbate หมายถึง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับโดยผิวของแข็ง หรือผิวของตัวดูดซับ

Adsorbent หมายถึง ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะจับของ adsorbate

Adsorption หมายถึง การดูดซับ

Solute หมายถึง โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว

Sorption หมายถึง การดูดติดทั้งสองชนิด ได้แก่ adsorption และ absorption

สำหรับการดูดซับ หรือ การเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็งเกิดขึ้นในสองลักษณะด้วยกันคือ

ก. การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Lyophobicity of solute)

ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophilic) จะพยายามแทรกตัวอยู่ระหว่างน้ำกับของแข็ง และดูดติดที่ผิวของของแข็งในที่สุด

ข. ความชอบของตัวถูกละลายที่จะไปเกาะติดที่ผิวของของแข็ง (high affinity of solute to solid) โดยการเกาะติดจะมีแรงอยู่ 3 แบบ ดังนี้

แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attraction force) มีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุ จะไปแลกเปลี่ยนติดกับโมเลกุลของสารอื่นได้ พวกไดวาเลนต์ (divalent) จะดูดซับที่ผิวของวัตถุอื่นได้ดีกว่าพวกโมนวาเลนต์ (monovalent)

แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) จะมีลักษณะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) โดยตัวถูกละลายไม่เลือกเกาะติดที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง แต่สามารถเกาะติดได้อย่างอิสระ และ เคลื่อนที่ได้ในระหว่างผิวของสารทั้งสอง บางครั้งเรียกได้ว่าเป็นการดูดซับในอุดมคติ (idea adsorption) การดูดซับแบบนี้ เกิดขึ้นได้ดีในที่มีอุณหภูมิต่ำ

ธรรมชาติทางเคมี (chemical nature) คือตัวถูกดูดซับจะเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดได้ดีในที่ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ว่า chemical adsorption, activated adsorption หรือ chemisorption ซึ่งการดูดซับในลักษณะนี้ ตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระระหว่างผิวของสารทั้งสอง และเป็นได้เฉพาะการดูดซับแบบขั้นเดียวเท่านั้น

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือแก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท

1. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้ จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาศึกษาโดยอาศัยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance) และวัดค่าแมกเนติกซัสเซพทิบิลิตี (magnetic susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับทางเคมีโดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60-70 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สามารถถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น และการดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดการผันกลับได้ (irreversible) หรือผันกลับได้แต่น้อยมากใช้เวลาการดูดซับนาน นั่นคือ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะไม่มีการหลุดออกมา หรือถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยาก และมักมีการเปลี่ยนรูปไปจากการศึกษาถ้าจะให้เกิดการผันกลับทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อขจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกมา

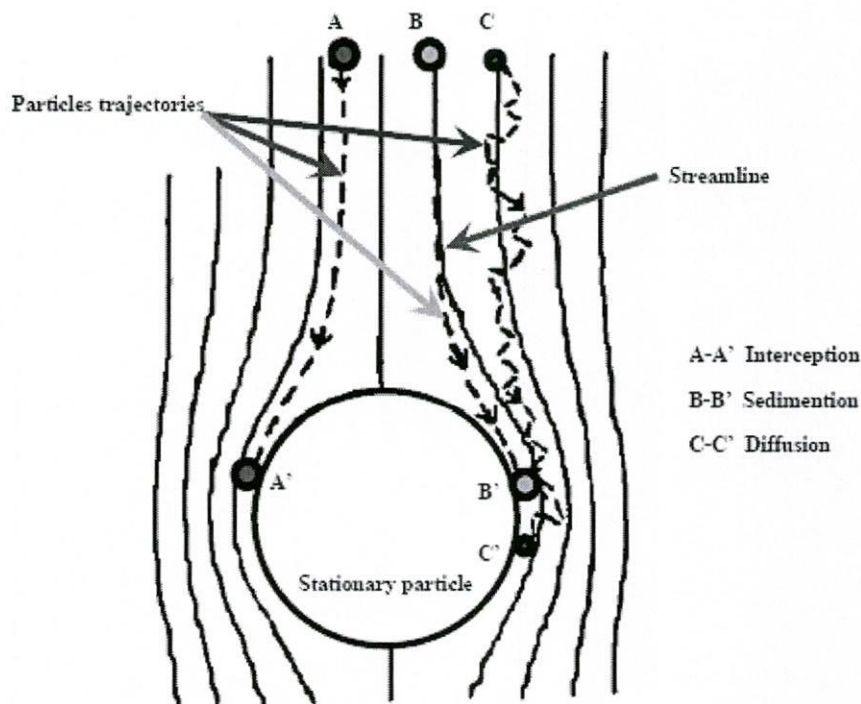
2. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนๆระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 50 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำและเป็นแบบหลายชั้น (multi molecular layer) ที่ความดันสูงหรือตัวถูกดูดซับอาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (superimpose layers) บนผิวของตัวดูดซับซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผันกลับได้ง่าย (reversible) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางกายภาพ หรือถึงสภาวะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมียกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมากจะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง กล่าวคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้ง่าย เช่น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อย หรือคายสารที่ถูกดูดซับออกมา (desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับ และตัวดูดซับเปลี่ยนแปลงแต่ประการใดการดูดซับจะทำให้ตำแหน่งเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับ

หมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์และแรงดึงดูดระหว่างขั้วมากกว่าการเกิดพันธะ

ขั้นตอนของการดูดซับ

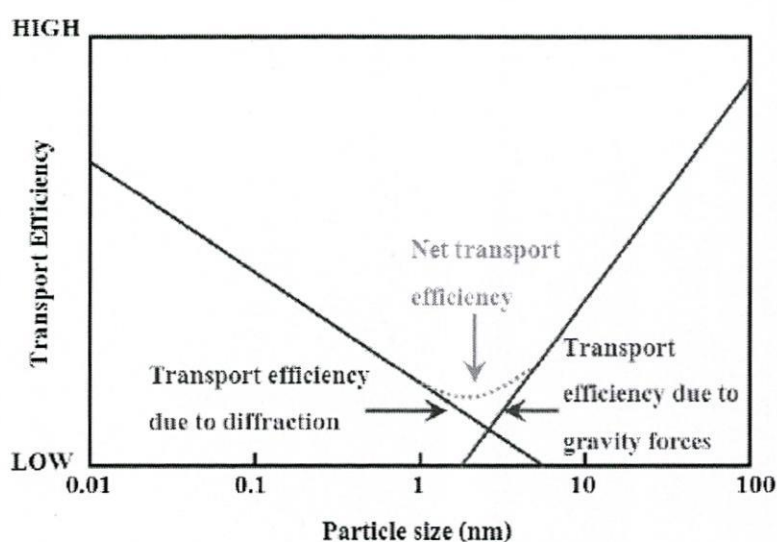
ขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยเข้าหาอนุภาคตัวดูดซับ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่อนุภาคตัวดูดซับซึ่งสารแขวนลอยนี้จะเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี (รูปที่ 2) โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนและเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคตัวดูดซับได้ขนาดและการกระจายขนาด (size distribution) ของสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก



รูปที่ 1.2 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาอนุภาคตัวดูดซับ (ที่มา: Yao, 1971)

พิจารณาจาก รูปที่ 3 คือเมื่อขนาดของสารแขวนลอยเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายจะแปรผันกับขนาดซึ่งก็คือ การแพร่กระจายจะทำให้สารขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีโอกาสวิ่งเข้าหาอนุภาคตัวดูดซับได้มากกว่าสารขนาดใหญ่แต่เมื่อสารมีขนาดเล็กมากกว่า 1 ไมครอน จะมีการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลน้อยมาก ขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอยจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอนและติดค้าง (sedimentation) ดังนั้น ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายจึงแปรผันตรงกับขนาดของสารแขวนลอย (รูปที่ 3) ทั้งนี้เนื่องจาก สารแขวนลอยขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากและมีปริมาณมาก จึงตกตะกอนหรือติดค้างบนตัวดูดซับได้ง่าย โดยพิจารณาจากที่กล่าวมา และจากรูปที่ 3 ก็จะพบว่าสารแขวนลอยที่มีขนาด 1 ไมครอนจะกำจัดออกได้ยากกว่าสารขนาดอื่น ในลักษณะของการกำจัดโดยวิธีการกรอง

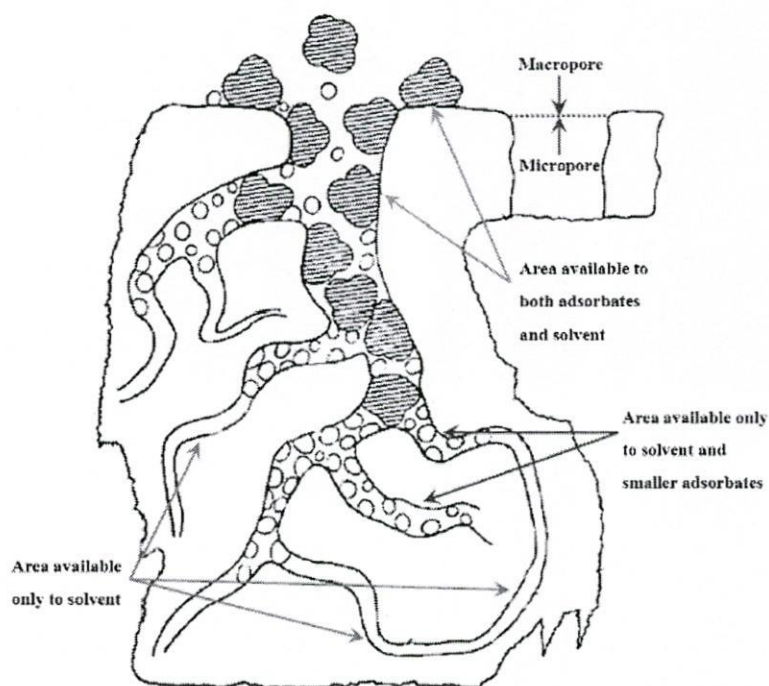


รูปที่ 1.3 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยที่ขึ้นอยู่กับขนาด (ที่มา: Yao, 1971)

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Film diffusion เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเข้ามาถึงอนุภาคตัวดูดซับซึ่งโดยปกติแล้วตัวดูดซับนี้จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบ คล้ายเยื่อต่างๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปในผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอน Pre diffusion เนื่องจากสาเหตุที่ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ที่โพรง หรือช่องว่าง (รูปที่ 4) โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของตัวดูดซับให้ได้จึงจะถูกดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้ โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องเกาะติดบนผิวของอนุภาคตัวดูดซับได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 1.4 แสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในอนุภาคตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ (ที่มา: New concept in water purification, 1974)

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลและหยุด ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และ ชีตความสามารถในการดูดซับ (มันส์ตัน ตัณพล เวศม์, 2539) มีดังต่อไปนี้

1. การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับอาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวนและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกัน ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

3. ขนาดของตัวดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

4. ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับ โมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำ หรือแตกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่นยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

5. อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก

ก. กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ข. อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวดูดซับ สำหรับตัวดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ แต่มีตัวดูดซับบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ความสามารถของตัวดูดซับประเภทหลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

6. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกดูดซับซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่างๆ มีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าที่ผิวของตัวดูดซับ ประกอบด้วยกลุ่มแตกตัวได้น้อย 2 ชนิด แสดงตามสมการที่ 2 และ 3



เมื่อ S^+ เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นกรด

S^- เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นเบส

ความหนาแน่นของประจุที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันตามปริมาณ S^+ และ S^- ที่มีอยู่ โดยเมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงจะมีปริมาณ S^- มากกว่า S^+ ดังนั้นจึงมีประจุลบที่ผิวตัวดูดซับ ส่วนที่ค่าความเป็นกรดต่ำจะมีปริมาณ S^+ มากกว่า S^- ดังนั้นที่ผิวตัวดูดซับจึงมีประจุเป็นบวก

7. ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

8. ตัวทำลาย

อิทธิพลของตัวทำลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นมาจาก

- ก. แรงกระทำระหว่างตัวทำลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- ข. แรงกระทำระหว่างตัวทำลายกับตัวดูดซับ ซึ่งเป็นแบบใด ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำลายและตัวดูดซับ
- ค. แรงกระทำระหว่างตัวทำลายกับผิวของตัวดูดซับ

มีการทดลองที่แสดงว่าโมเลกุลของตัวทำลายสามารถถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับได้ ในกรณีที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ถ้าผิวของสารดูดซับและโมเลกุลของตัวทำลายมีความเป็นบวกมาก เฮบัวร์ (De Boer) ได้แสดงลำดับความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลของกรดลอริก (lauric acid) บนผิวอะลูมินาเมื่อใช้ตัวทำลายต่างๆ ดังนี้ เพนเทน > เบนซีน > ไดเอทิลอีเทอร์ (pentane > benzene > diethyl ether) จะเห็นว่าเมื่อความเป็นขั้วของตัวทำลายเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลของกรดลอริก บนผิวอะลูมินาลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับของโมเลกุลบนตัวทำลายเหล่านั้นบนผิวอะลูมินาแทน และ จะเกิดการดูดซับได้ดี เมื่อความเป็นขั้วของตัวทำลายเพิ่มขึ้น (ปรินทร เต็มญารศิริ, 2551)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

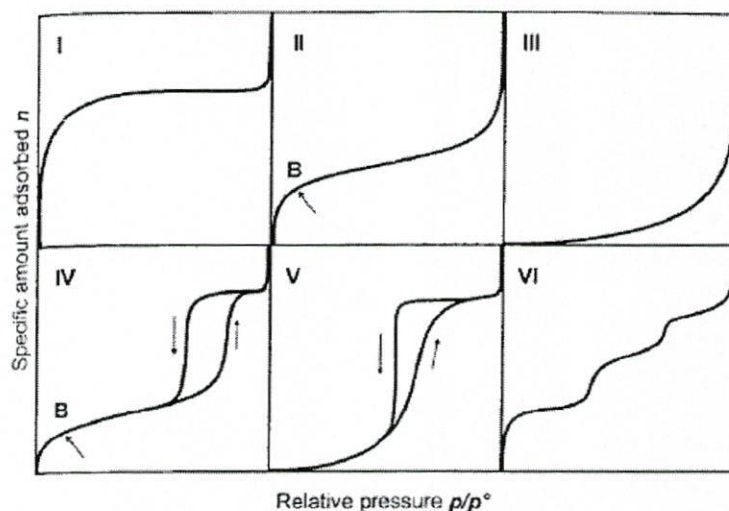
การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกละลาย และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอร์ม (isotherm)” ดังแสดงใน (รูปที่ 5) ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่านได้แก่ S.Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E.Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มี

ความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับ ทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point of knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้ จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟมีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง



รูปที่ 1.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (ที่มา: Department of Chemistry. Surface Analysis Facility. University of Oxford, ออนไลน์)

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับเป็นไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิด

การควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type V เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิว ที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สบนผิวของแข็งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับกับความดันของแก๊สที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ส่วนกรณีการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็ง จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลายอาจคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{(C_o - C_l)V}{m} \quad (4)$$

เมื่อ a เป็นจำนวน โมลของตัวถูกดูดซับ

C_o เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ

C_l เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกดูดซับ

V เป็นปริมาตรของตัวถูกดูดซับ

m เป็นมวลของตัวดูดซับ

หากพิจารณาที่สถานะสมดุล สามารถเขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (5)$$

เมื่อ q_e เป็นจำนวน โมลของตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย เออร์วิง ลางเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่ง (adsorption site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับ โมเลกุลของตัวดูด

จับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{X}{m} = \frac{Q^o b C_e}{1 + b C_e} \quad (6)$$

เมื่อ q_e เป็นปริมาณของตัวดูดซับบนตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม

X เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ

m เป็นปริมาณตัวดูดซับ

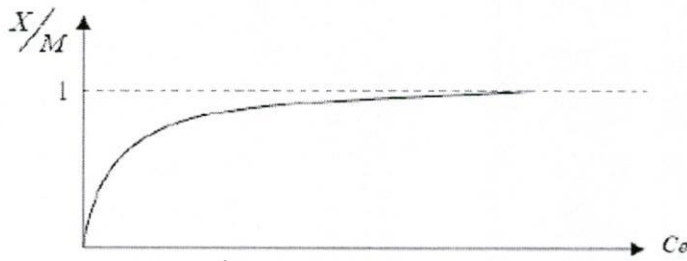
a เป็นจำนวนโมลของตัวถูกดูดซับ

C_e เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

Q^o เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

b เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ C_e จะได้ดังรูปที่ 6



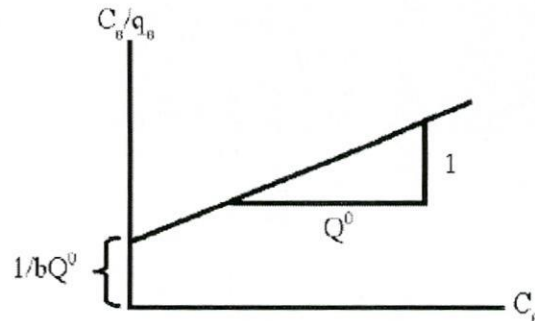
รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

(ที่มา: Cheremisinoff and Morresi, 1987)

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^o} + \frac{C_e}{Q^o} \quad (7)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงมีจุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{bQ^0}$ และมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (ที่มา: Cheremisinoff and Morresi, 1987)

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย ฟินเลย์ ฟรอนด์ลิช (Findly Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (rough surface) โดยแต่ละพื้นที่ที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นที่ผิวที่ให้ความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของสมการฟรอนด์ลิช คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของฟรอนด์ลิชที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

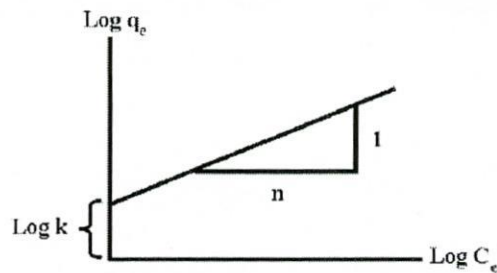
$$q_e = \frac{X}{m} = kC_e^{1/n} \quad (8)$$

- เมื่อ
- q_e เป็นปริมาณของตัวดูดซับบนตัวดูดซับ หน่วย 1 กรัม
 - X เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
 - m เป็นปริมาณตัวดูดซับ
 - C_e เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 - k เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
 - n เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรอนด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (9)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า k ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$ ก็สามารถหาค่า n ได้ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นตัวอย่างไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช



รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e \left(\log \frac{X}{m} \right)$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟรอยด์ลิช (ที่มา: Cheremisinoff and Morresi, 1987)

3. สมการการดูดซับของบรูนาเออร์ แอมเมทท์ และ เทลเลอร์ (Brunauer-Emlett

Teller equation: BET equation)

เป็นสมการที่เสนอโดย สตีเฟน บรูนาเออร์, พอล ฮิวจ์ แอมเมทท์ และเอ็ดเวิร์ด เทลเลอร์ โดยเป็นการนำไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวตัวดูดซับ

จากการศึกษาสมการของ บรูนาเออร์ แอมเมทท์และเทลเลอร์ ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$\frac{P}{n(P^o - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \left(\frac{P}{P^o} \right) \quad (10)$$

เมื่อ P เป็นความดันไออิ่มตัวของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล

P^o เป็นความดันไออิ่มตัวของตัวดูดซับที่อุณหภูมิของการดูดซับ

n เป็นปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

n_m เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงตัวแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ

C เป็นค่าคงที่ ที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ โดย

$$C = \exp \left[\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right] \quad (11)$$

เมื่อ ΔH_A เป็นความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

ΔH_L เป็นความร้อนของการควบแน่น

R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)

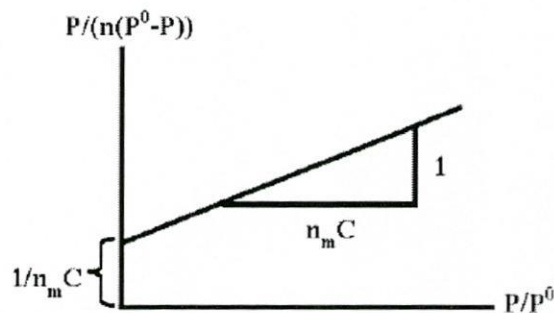
T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ดังนั้น

$\Delta H_A - \Delta H_L =$ ความร้อนสุทธิของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{n(P^0 - P)}$ กับ $\left(\frac{P}{P^0} \right)$ จะได้กราฟ

เส้นตรงและสามารถคำนวณหาค่า C และ n_m ได้ความชันและจุดตัดกราฟตามลำดับจากนั้นคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากค่า n_m



รูปที่ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{n(P^0 - P)}$ และ $\left(\frac{P}{P^0} \right)$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของบรูนาเออร์ แอมเมทท์และเทเลอร์ (ที่มา: Cheremisinoff and Morresi, 1987)

โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชัน (oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) ได้รูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organic compound) โดยสามารถถ่ายทอดคู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านทางโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1.3 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่มา และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์

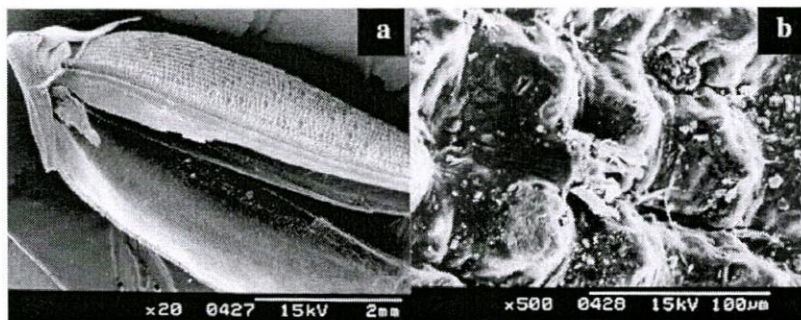
โลหะหนัก	แหล่งที่มา	ผลกระทบต่อสุขภาพ	ระดับที่อนุญาตให้มีได้ (ppm)
สารหนู	สารกำจัดศัตรูพืช สารกำจัดเชื้อรา การถลุงโลหะ	หลอดเลือดอักเสบ ผิวหนังอักเสบ	0.02
แคดเมียม	การเชื่อมโลหะ การชุบโลหะ สารกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ย แบตเตอรี่ โรงปฏิกรณ์ปรมาณู	ทำลายตับ หลอดลมอักเสบ ระบบทางเดินอาหาร ไชกระดูก มะเร็ง	0.06
ตะกั่ว	โรงงานทำสี สารกำจัดศัตรูพืช ควันท่อไอเสียรถยนต์ การทำเหมือง การเผาถ่าน	ทำลายตับ ไต ระบบทางเดินอาหาร ในเด็กทำให้ปัญญาอ่อน	0.1
แมงกานีส	การเชื่อมโลหะ สารเติมในน้ำมันเชื้อเพลิง การผลิตโลหะ ผสมเหล็กและแมงกานีส	สูดดมหรือสัมผัสจะทำลายระบบประสาทส่วนกลาง	0.26
ปรอท	สารกำจัดศัตรูพืช แบตเตอรี่อุตสาหกรรมกระดาศ	ทำลายระบบประสาท เป็นพิษต่อโพรโทพลาสซึม	0.01
สังกะสี	โรงกลั่น การผลิตทองเหลือง การชุบโลหะ ท่อประปา	ไอของสังกะสีกัดกร่อนผิวหนัง ทำลายเยื่อประสาท	15
นิกเกิล	โรงงานทำแม่เหล็ก เครื่องยนต์ เคลือบโลหะ ทำเหรียญกษาปณ์ ทำเครื่องประดับ แบตเตอรี่ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และทันตกรรม	ผิวหนังอักเสบ อาการคลื่นไส้ อาเจียน มะเร็งในโพรงจมูก	0.02

(ที่มา: Alluri, HK., et al. 2007 และ ศูนย์เครือข่ายบริการทดสอบ วิเคราะห์ วิจัยด้านอุตสาหกรรม Food Amendment Regulations. 2011.)

1.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ในงานศึกษาวิจัยนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเนื่องจากการนำวัสดุชีวมวลได้แก่ ถั่วแกลบ และถั่วไม้อย่างพาราและถั่วจากพืชต่างๆ หรือเศษวัสดุเหลือใช้ในการกำจัดสารละลายโลหะหนัก ดังนี้

การใช้ถั่วแกลบในการกำจัดโลหะหนัก มีการศึกษาการใช้ถั่วแกลบ (รูปที่ 10) มากำจัดโลหะหนักได้แก่ แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของถั่วแกลบทางด้านขนาดอนุภาค ความหนาแน่น ความพรุน และขนาดของรูพรุน ซึ่งมีค่า 150.47 ไมครอน, 104.9 kg/m^3 , $36.44 \text{ m}^2/\text{g}$, 42.603 A° ตามลำดับ สำหรับสารละลายโลหะหนักที่เตรียมมีค่า pH ประมาณ 6 สามารถกำจัดโลหะหนักที่เป็น สังกะสี นิกเกิล และ แคดเมียม มีค่าประมาณ 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่ใช้ปริมาณถั่วแกลบในการกำจัดอยู่ในช่วง 7-10 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการดูดซับโลหะหนัก 100 นาที (Vimal et al., 1999) อีกทั้งยังมีการศึกษาการกำจัดโลหะหนักคือ ตะกั่ว ด้วยถั่วแกลบโดยค่า pH ของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการดูดซับมีค่า 5.5 และใช้ถั่วแกลบในปริมาณ 7-10 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการดูดซับประมาณ 75 นาที สามารถทำการดูดซับโลหะหนักได้ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ (Tarun et al., 2009) การศึกษาการดูดซับโลหะหนักได้แก่ แคดเมียม และนิกเกิล ด้วยถั่วแกลบ และมีการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรอยด์ลิชเปรียบเทียบในลักษณะต่างๆ โดยค่า pH ที่เหมาะสมของการดูดซับอยู่ประมาณ 5.5 (Vimal et al., 2009) การศึกษาการใช้ถั่วแกลบผสมกับสารพอลิเมอร์คือพอลิเอนิลีนเป็นวัสดุผสมระดับนาโนที่สามารถกำจัดปรอทโดยการผสมกันทางเคมีและมีการกรองวัสดุผสมดังกล่าวแล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการกำจัดปรอทที่ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ที่ค่า pH ประมาณ 10 โดยที่ความเร็วในการกวนที่ 400 รอบต่อนาที นาน 20 นาที (Mohsen et al., 2011) การใช้ถั่วแกลบในการดูดซับทองแดงโดยการวิเคราะห์ด้วย FTIR เมื่อเปรียบเทียบถั่วแกลบที่เป็นถั่วที่ไม่ได้ผ่านการเผาและถั่วแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และทำการดูดซับสารละลายทองแดงของระบบที่มีค่า pH ระหว่าง 4-4.5 ปรากฏว่าผลของถั่วแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสารละลายทองแดงได้ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถั่วแกลบที่ไม่ผ่านการเผาสามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้เพียง 53 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น (Woranan et al., 2011) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยศึกษาการใช้ถั่วแกลบมากำจัดปรอทด้วยวิธีไอโอไดน์ (Pengfei et al., 2011) และได้มีการใช้ถั่วแกลบมากำจัดโลหะหนักได้แก่ แคดเมียม และสังกะสี (Vimal et al., 2008) ตะกั่วและปรอท (Qingge et al., 2004) โดยใช้ทฤษฎีไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรอยด์ลิชเปรียบเทียบในลักษณะต่างๆ อีกทั้งยังได้ศึกษาการกำจัดกรดฮิวมิกซึ่งเป็นสารเคมีที่พบได้ในแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินที่เป็นสารก่อมะเร็งโดยใช้ถั่วแกลบมากำจัดอีกด้วย (Apichat et al., 2010)



รูปที่ 1.10 (a) รูปเจ้ากล้วย (b) ความหนาแน่นของซิลิกาที่มีอยู่ในเจ้ากล้วย (ที่มา: Yue, C. et al. 2011)

การใช้เจ้ากล้วยในการกำจัดโลหะหนัก งานวิจัยที่ศึกษาองค์ประกอบทางด้านกายภาพของเจ้ากล้วย (Dongmin et al., 2010) องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4-5) และ (รูปที่ 11) ลักษณะของเจ้ากล้วยพารา(คณพลและมาหามะสุโฮมิ, 2550) ได้มีงานวิจัยที่ใช้เจ้ากล้วยพาราในการดูดซับสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและมีการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรอยด์ลิชเปรียบเทียบในลักษณะต่างๆ โดยได้นำเจ้ากล้วยพาราไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C แล้วนำเจ้ากล้วยไปผ่านตะแกรงขนาด 53 ไมครอนแล้วนำเจ้ากล้วยพาราไปแช่ในสารละลายกรดไนตริกนาน 4 ชั่วโมง แล้วทำการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 6.8-6.9 แล้วทำการล้างอนุภาคแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C แล้วนำอนุภาคที่ผ่านการอบไปทำการดูดซับสารละลายนิกเกิลซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่างๆ และในขณะที่ทำการดูดซับก็ให้มีการกวนไปด้วยโดยปรับให้มีอุณหภูมิ 30°C นาน 4 ชั่วโมง ผลการทดลองของการดูดซับสารละลายนิกเกิลซัลเฟตด้วยเจ้ากล้วยพาราได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ (Shameem et al., 2000) อีกทั้งยังได้นำเจ้ากล้วยพารามาทำเป็นถ่านกัมมันต์ (Srinivasakannan et al., 2004) ดูดซับสารละลายทองแดง (Helen et al., 2005)

ตารางที่ 1.4 แร่ประกอบของเจ้ากล้วยพารา ด้วย XRD

ชนิดของแร่ (%)	เจ้ากล้วยพารา
แคลไซต์ (CaCO_3)	88.24
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2)*	5.52
เพอริเคลส (MgO)	5.29
อาร์เซไนต์ (K_2SO_4)	0.52
แคลเซียมฟอสเฟตบอเรต ($\text{Ca}_x(\text{P}_y\text{B}_z)(\text{B}_m\text{O}_n)$)*	0.40

* เป็นสารประกอบทางเคมีที่พบในเจ้ากล้วยพารา (ที่มา: คณพลและมาหามะสุโฮมิ, 2550)

นอกจากเถ้าไม้ยางพาราแล้วใบยางที่ร่วงสามารถนำมาดูดซับสารละลายทองแดงอีกด้วย โดยการนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C ค้างคืนแล้วนำมาบดผ่านตะแกรงขนาด 355-500 ไมครอน แล้วนำผงที่ได้ไปผสมกับสารเคมีให้มีค่า pH ในช่วง 2-9 แล้วนำไปดูดซับสารละลายทองแดงโดยให้มีความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที แล้วทำการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรอยด์ลิชเปรียบเทียบ(Wan Ngah et al., 2008)

ตารางที่ 1.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

สารประกอบ	ปริมาณของสารประกอบ (%)									อ้างอิง
	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	LOI*	
เถ้าแกลบ	0.17	0.09	0.42	78.44	1.46	0.45	0.19	-	18.68	(Dongmin et al., 2010)
เถ้าไม้ ยางพารา	3.50	-	0.26	1.52	1.52	1.52	0.26	1.86	32.82	(คณพลและ มา หามะ สุ ใ ฮ มี , 2550)

* LOI: Loss on ignition

การใช้เถ้าไม้อื่นๆ ในการกำจัดโลหะหนัก การศึกษาการนำเศษวัสดุชีวมวลกะลามะพร้าวมาสกัดเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อทำการกำจัดสารละลายโลหะหนักคือสังกะสี (Amuda et al., 2007) อีกทั้งยังใช้เปลือกมะพร้าวที่มีสีเขียวมากำจัดโลหะหนักโดยมีการปรับค่า pH ด้วยสารเคมีนาน 3 ชั่วโมง แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 80°C แล้วนำไปคัดขนาดให้มีขนาดในช่วง (0.246- 0.074 มม.) แล้วนำไปกำจัดสารละลายโลหะหนักผลการทดลองพบว่าเปลือกมะพร้าวดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายโลหะหนักดังนี้ $\text{Cu}^{+2} > \text{Pb}^{+2} > \text{Cd}^{+2} > \text{Zn}^{+2} > \text{Ni}^{+2}$ (Francisco et al., 2010) การศึกษาการดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยเปลือกส้มผลการทดลองได้ผลว่าการดูดซับสารละลายโลหะหนักเป็นดังนี้ Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} มีค่าการดูดซับคือ 77.60, 76.57, 218.34, 49.85 และ 15.45 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 20 นาที (Liang et al., 2010) การนำเปลือกลำไยจากกระบวนการแปรรูปลำไย จังหวัดลำพูน ที่คัดแยกเอาเมล็ดและเนื้อลำไยออกแล้ว นำไปล้างทำความสะอาด ตากแดดบนตะแกรงในลอนเป็นเวลา 3 วัน บดให้ละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 250 – 850 ไมครอน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แบ่งเป็น 3

ส่วน แต่ละส่วนนำไปปรับสภาพด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส, กรดซัลฟูริกเข้มข้น ในสัดส่วนกรดซัลฟูริก : เปลือกกล้วย เท่ากับ 1 : 1.8 แล้วอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอลในสัดส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล : เปลือกกล้วย เท่ากับ 1 : 1.8 แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่พบว่าเปลือกกล้วยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมได้สูงสุด คือ 88.75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนคือเปลือกกล้วยแห้ง และเปลือกกล้วยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายต่างกำจัดโลหะแคดเมียมได้ไม่แตกต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ประจวบ และ บัญชา, 2547) อีกทั้งยังมีการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วของเปลือกมังคุด โดยศึกษาการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเลด(II) ในเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.500 mol/l, 0.250 mol/l, 0.125 mol/l, 0.062 mol/l, 0.031 mol/l, 0.016 mol/l, 0.008 mol/l, 0.004 mol/l, 0.002mol/l, 0.001 mol/l และ 0.0005 mol/l ตามลำดับ กับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ความเข้มข้น 1 mol/l จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วของเปลือกมังคุด โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วของน้ำสกัดจากเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้นของสารละลายเลด(II)ในเตรตความเข้มข้นต่างๆกัน หาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำสกัดจากเปลือกมังคุดในการดูดซับสารตะกั่วระยะเวลาที่เหมาะสม และศึกษาการแปรรูปเปลือกมังคุดไปใช้ในการดูดซับสารตะกั่ว พบว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเลด(II)ในเตรตกับ สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ เกิดตะกอนสีเหลืองที่ความเข้มข้น 0.500 mol/l, 0.250 mol/l, 0.125 mol/l, 0.062mol/l, 0.031 mol/l, 0.016 mol/l, 0.008 mol/l, 0.004 mol/l และ 0.002 mol/l และน้ำสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถดูดซับสารตะกั่วจากสารละลายเลด (II)ในเตรตได้ที่ความเข้มข้น 0.008 mol/l, 0.004 mol/l และ 0.002 mol/l ในอัตราส่วนระหว่างสารละลายเลด (II)ในเตรตต่อน้ำสกัดจากเปลือกมังคุด เป็น 10 : 12, 10 : 5 และ 10 : 2 โดยปริมาตรตามลำดับ ในระยะเวลา 15 นาที ส่วนการแปรรูปเปลือกมังคุดไปใช้ในการดูดซับสารตะกั่ว พบว่าการทำเป็นผงแห้งเหมาะสมที่สุด (ชานนท์ และคณะ, 2546) นอกจากนี้ยังมีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการใช้วัสดุชีวมวลมาดูดซับโลหะหนัก (United States Patent 5,626,765,1997) ได้นำเปลือกต้นโอ๊กที่ไม่ละลายน้ำและหรือเปลือกต้นโอ๊ก (tannin) ที่เป็นเจลที่สามารถดูดซับโลหะหนักและทำการปรับค่าความเป็นกรดด้วยสารละลายที่เป็นสารเคมีที่ได้จากธรรมชาติหรือสารเคมีเชิงพาณิชย์ (United States Patent 5,460,791,1995) ได้ใช้เปลือกต้นโอ๊กในการดูดซับโลหะหนักได้แก่ ยูเรเนียม (uranium) ทอเรียม (thorium) ชูเรียม (curium) อะเมริเซียม (americium) เนปจูเนียม (neptunium) ตะกั่ว (lead) แคดเมียม (cadmium) โครเมียม (chromium)ปรอท (mercury) เหล็ก (iron) และสารอื่นๆที่มีส่วนผสมของสารเคมีที่ได้กล่าว ด้วยกระบวนการย่อยสลายและการปรับค่าความเป็นกรดต่างเช่นกัน

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1 ศึกษาขนาดอนุภาค อุณหภูมิการเผา ของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่นำมาเป็นส่วนผสมหลักในการดูดซับโลหะหนัก

2 ศึกษาปัจจัยด้านค่าความเป็นกรด ต่างของระบบ ปริมาณเถ้าที่ใช้ เวลาในการดูดซับ สารละลายโลหะหนัก

3 ตรวจสอบค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักหลังจากดูดซับด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

มุ่งเน้นศึกษาการนำเถ้าแกลบและ เถ้าไม้ยางพารามาใช้เป็นวัสดุดิบ เพื่อมากำจัดสารละลายโลหะหนักโดยการนำวัสดุดิบมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้น เพื่อที่จะนำไปสู่กระบวนการสังเคราะห์โดยมีการแปรผันตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ปริมาณเถ้า อุณหภูมิในการเผา ค่าความเป็นกรด ต่าง เวลาในการดูดซับ และนำไปทำการดูดซับสารละลายโลหะหนักคือ สารละลายนิกเกิล ทองแดง และเหล็ก

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางสร้างระบบบูรณาการเพิ่มมูลค่าแก่เศษวัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์จากภาคอุตสาหกรรมข้าวและอุตสาหกรรมไม้ยางพารา

2. เป็นแนวทางการจัดการและการบำบัดน้ำเสียที่มีสารละลายโลหะหนักที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

3. เป็นการกำจัดมลภาวะสิ่งแวดล้อมของโรงงานทั้งในการลดพื้นที่ฝังกลบขยะและมลภาวะทางอากาศ

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย

2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้คือ ศึกษาอุณหภูมิในการเผาตัวดูดซับคือถ่านแกลบและถ่านไม้ยางพารา ปริมาณที่เหมาะสมของตัวดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับสารละลายโลหะหนัก โดยศึกษาองค์ประกอบทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี ของตัวดูดซับ รวมทั้งการทดสอบสมบัติกับสารละลายโลหะหนักต่างชนิดกัน (รูปที่ 2.1)

2.2 วัสดุที่ใช้

1. ถ่านแกลบ จากโรงสี บ้านสวนตุล อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา
2. ถ่านไม้ยางพารา จากโรงงานผลิตปลาป่น อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา (รูปที่ 2.2)

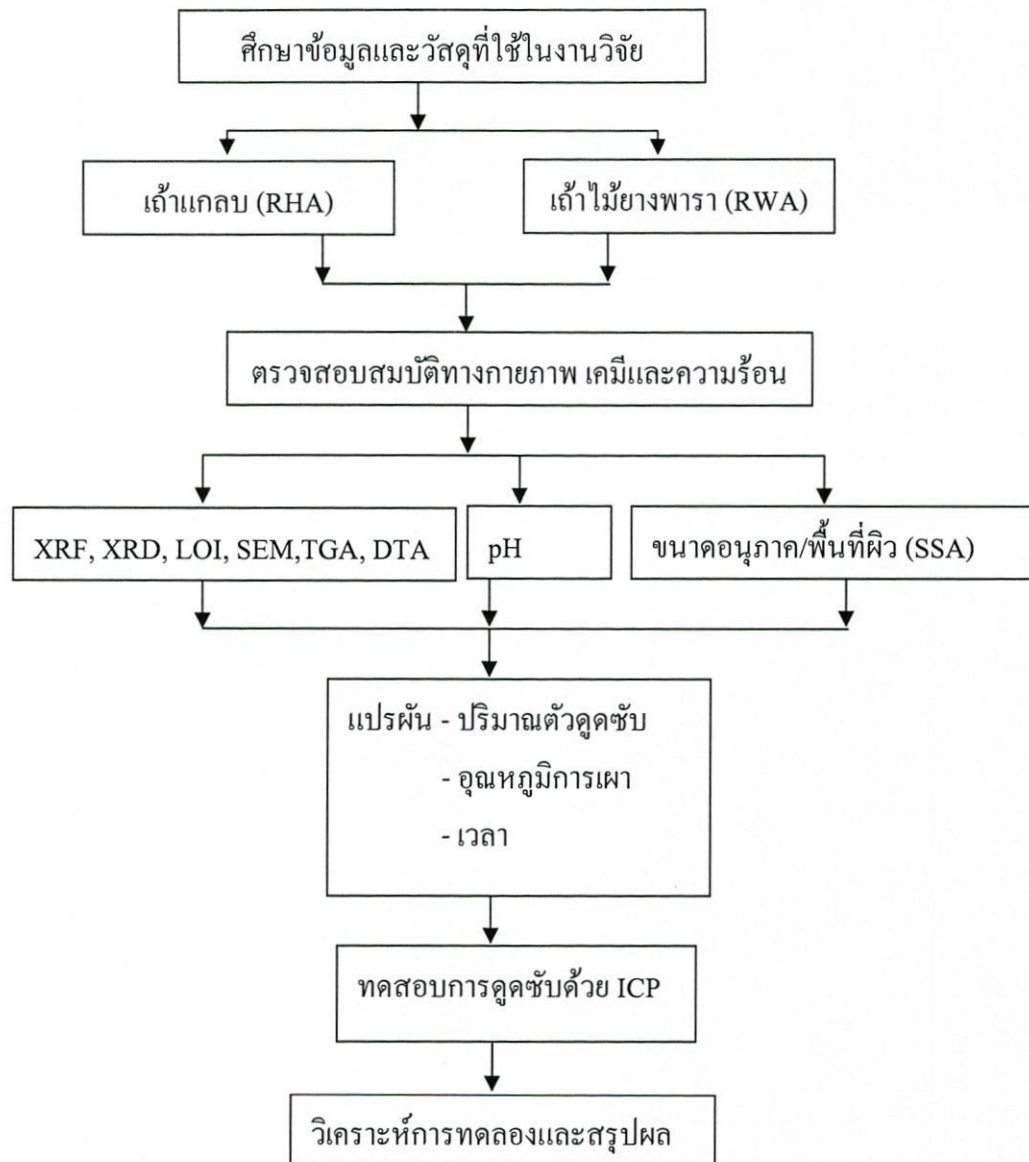
2.2.1 การออกแบบการวิจัย

1. นำถ่านแกลบและถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากกระบวนการผลิตเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทำการทดลองทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นด้วยเครื่อง XRF และ SEM
2. นำถ่านที่ได้จากโรงงานการผลิตและทำการเผาที่อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส นำมาดูดซับสารละลายโลหะหนักได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และเหล็กโดยเตรียมสารละลายนิกเกิล ทองแดงและเหล็กจาก นิกเกิลไนเตรด ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) คิวปริกอะซีเตด ($\text{CH}_3\text{COO}_2\text{Cu} \cdot \text{H}_2\text{O}$) และเหล็กคลอไรด์ (FeCl_3) แล้วทำการกวนที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่เวลา 5-25 นาที โดยความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าวมีความเข้มข้นเริ่มต้นคือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) โดยใช้แปรผันปริมาณถ่านที่ 0.8, 1.0 และ 1.2 กรัมต่อสารละลายโลหะหนักปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ml) แล้วไปทดสอบค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปด้วย เครื่อง Induced couple plasma (ICP)
3. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของการทดลอง
4. สรุปผลการศึกษาวิจัย และเขียนรายงานวิจัย

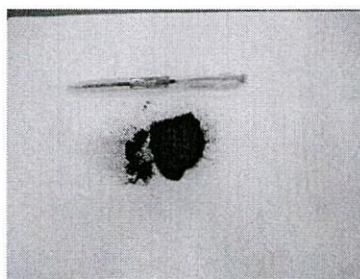
2.2.2 การศึกษาวัตถุดิบที่ใช้

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆของวัตถุดิบที่ได้นำมาเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส แล้วนำมาทดสอบ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพนั้นจะนำเอาวัตถุดิบที่มีการดูดซับดีคือวัตถุดิบที่ผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส (จากผลทดลองบทที่ 3) วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 2 อย่าง ได้แก่ ถ่านแกลบจากโรงสีในหมู่บ้านสวนตุล อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา และ ถ่านไม้ยางพารา ได้จากโรงงานผลิตปลาป่น อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา โดยนำถ่านทั้งสองชนิด นำไปหาขนาดการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเครื่องวัด

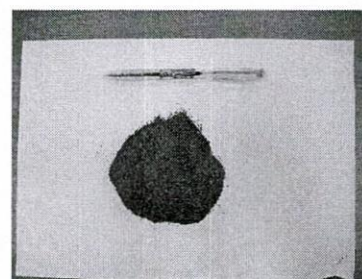
ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer รุ่น Mastersizer 2000 Version 5.1 จากนั้นนำเข้าไปดูค่า สารละลายโลหะหนักได้แก่ นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe)



รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



เถ้าไม้แกลบ



เถ้าไม้ยางพารา

รูปที่ 2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

2.3 ขั้นตอนการวิจัย

อันประกอบด้วยขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

- หากการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Analysis) และพื้นที่ผิววัดด้วยเครื่องวัดการกระเจิงของอนุภาคจากแสงเลเซอร์ Beckman Coulter รุ่น Mastersizer 2000 Version 5.1

- ความหนาแน่นจริง (True Density) วัดด้วยเครื่อง Stereopycnometer (Quantachrome)

- ความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัดด้วยเครื่อง pH meter รุ่น Cyber Scan 510

- การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Differential Thermal Analyzer รุ่น PerkinElmer, DTA7 และเครื่อง Thermogravimetric Analyzer รุ่น PerkinElmer, TGA7

- ตรวจชนิดแร่และสารประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction รุ่น Philips X'Pert MPD และ X-Ray Fluorescence –XRF รุ่น Philips PW2400

- ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ (Microstructure) ด้วยกล้องส่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JSM- 5800LV, JEOL

- ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) รุ่น Perkin-Elmer, 4300 DV

2.3.2 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก

การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับของสารละลาย

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad \% \text{Removal} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ %Removal = เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)

C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L)

C = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L)

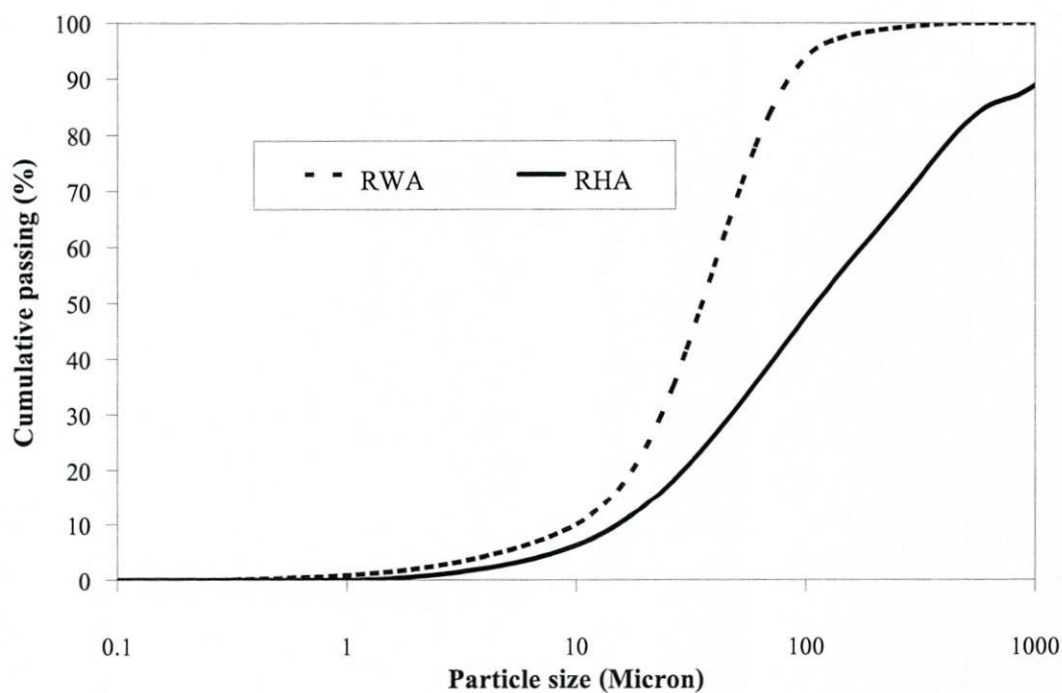
บทที่ 3

ผลการศึกษา

3.1 ลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการดูดซับ

3.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวดูดซับทางกายภาพ ซึ่งผลของการวิเคราะห์ของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ที่นำมาใช้ในการทดลอง (รูปที่ 3.1) จากผลการทดลองหาค่าพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีค่า 0.18 และ 0.41 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา พบว่ามีการกระจายตัวมากที่สุดอยู่ในช่วง 1083.51 และ 84.53 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีค่าค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (ตารางที่ 3.2)



รูปที่ 3.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของวัสดุ

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผงวัสดุ

ชนิดของเถ้า	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
เถ้าแกลบ	0.18
เถ้าไม้ยางพารา	0.41

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดผงวัตถุดิบ

ขนาดที่ผ่านตะแกรง	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
	เถ้าเกลบ	เถ้าไม่ย่างพารา
10	15.16	10.00
20	30.20	17.38
30	46.17	22.90
40	70.28	30.10
50	111.56	35.43
60	140.38	40.12
70	316.23	52.41
80	478.31	68.18
90	1083.51	84.53

3.2 ผลความหนาแน่นจริง (True Density)

ซึ่งค่าความหนาแน่นจริงของแกรนิตทั้งสองแหล่งมีค่าเท่ากัน ส่วนเถ้าเกลบและเถ้าไม่ย่างพาราคความหนาแน่นจริงมีค่า 2.67 และ 2.45 กรัม/ลบ.ซม. ตามลำดับ (ตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.3 ความหนาแน่นจริง

วัสดุดิบ	ค่าความหนาแน่นจริง (กรัม/ลบ.ซม.)			
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เถ้าเกลบ	2.68	2.66	2.67	0.005
เถ้าไม่ย่างพารา	2.48	2.44	2.45	0.002

3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

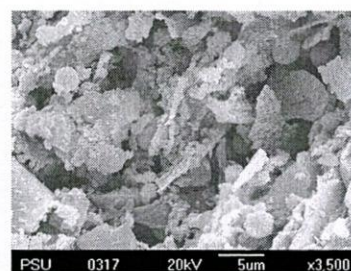
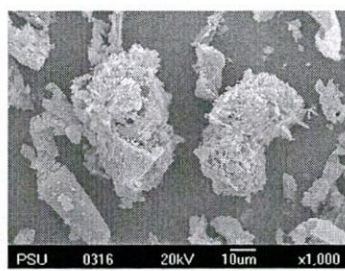
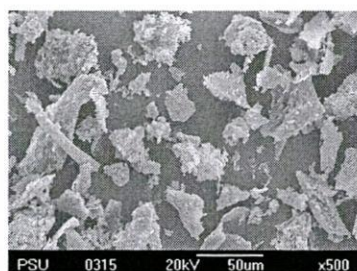
ค่า pH ของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบมีความเป็นกรดอ่อนๆ เมื่อทดสอบด้วยเถ้าเกลบสารละลายโลหะหนักจะมีค่าเป็นกลางแต่เมื่อนำมาทดสอบด้วยเถ้าไม่ย่างพาราจะมีค่าความเป็นด่าง (ตารางที่ 3.4)

ตารางที่ 3.4 ค่า pH ของสารละลาย

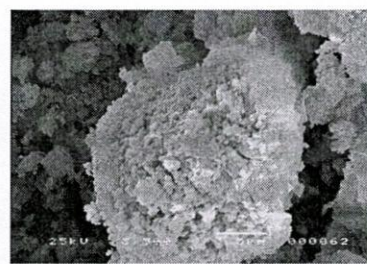
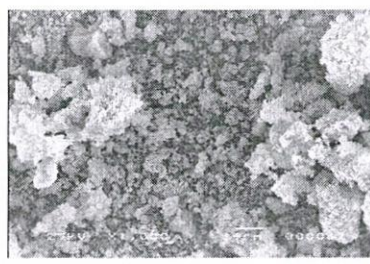
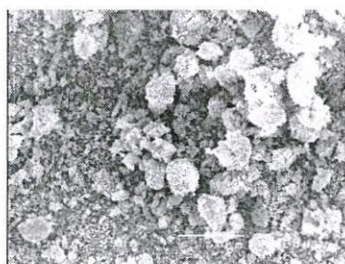
ชนิดของวัสดุ	ค่า pH
สารละลายนิกเกิล (Ni)	6
สารละลายทองแดง (Cu)	6
สารละลายนิกเกิลดูดซับด้วยเถ้าแกลบ (Ni+RHA)	7
สารละลายนิกเกิลดูดซับด้วยเถ้าไม้ยางพารา (Ni+RWA)	10
สารละลายทองแดงดูดซับด้วยเถ้าแกลบ (Cu+RHA)	7
สารละลายทองแดงดูดซับด้วยเถ้าไม้ยางพารา (Cu+RWA)	10

3.4 ผลการวิเคราะห์วัตถุด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราด

ผลการส่องกล้องด้วยกำลังขยาย 500 เท่า 1,000 เท่า และ 3,500 เท่าตามลำดับ (รูปที่ 3.2) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ เถ้าแกลบมีลักษณะทรงเหลี่ยมตัน (รูปที่ 3.2 ก) ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเถ้าไม้ยางพารามีลักษณะเป็นเหลี่ยมมีความพรุน (รูปที่ 3.2 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ก) เถ้าแกลบ และ ข) เถ้าไม้ยางพารา ด้วยกำลังขยาย 500 1,000 และ 3,500 เท่า ตามลำดับ

3.5 ผลการวิเคราะห์วัตถุด้วย X-ray fluorescence (XRF)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา (ตารางที่ 3.5) จะเห็นว่าของเถ้าแกลบมีเปอร์เซ็นต์สารประกอบของ SiO_2 สูง ส่วนเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณสารประกอบของ CaO สูง สำหรับเถ้าไม้ยางพารามีน้ำหนักที่สูญหายไป (Loss on ignition, LOI)

ค่อนข้างสูงกว่าเถ้าแกลบเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปฏิกิริยานี้เองสอดคล้องกับรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเถ้าไม้ยางพาราที่มีลักษณะความพรุนมากกว่าเถ้าแกลบ (รูปที่ 3.2 ข) และสอดคล้องกับความหนาแน่นจริงของเถ้าไม้ยางพาราที่มีความหนาแน่นจริงน้อยกว่าเถ้าแกลบ (ตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

สารประกอบ	เถ้าแกลบ (%)	เถ้าไม้ยางพารา (%)
CaO	0.84	48.24
SiO_2	67.88	1.52
K_2O	4.20	8.44
MgO	1.76	3.50
P_2O_5	5.08	1.86
SO_3	0.36	1.28
Al_2O_3	0.58	0.26
Fe_2O_3	0.47	0.26
Rb_2O	0.04	-
MnO	0.23	-
MnO_2	-	1.42
Cl	-	0.30
SrO	-	0.10
น้ำหนักที่สูญหาย (LOI)	18.56	32.82

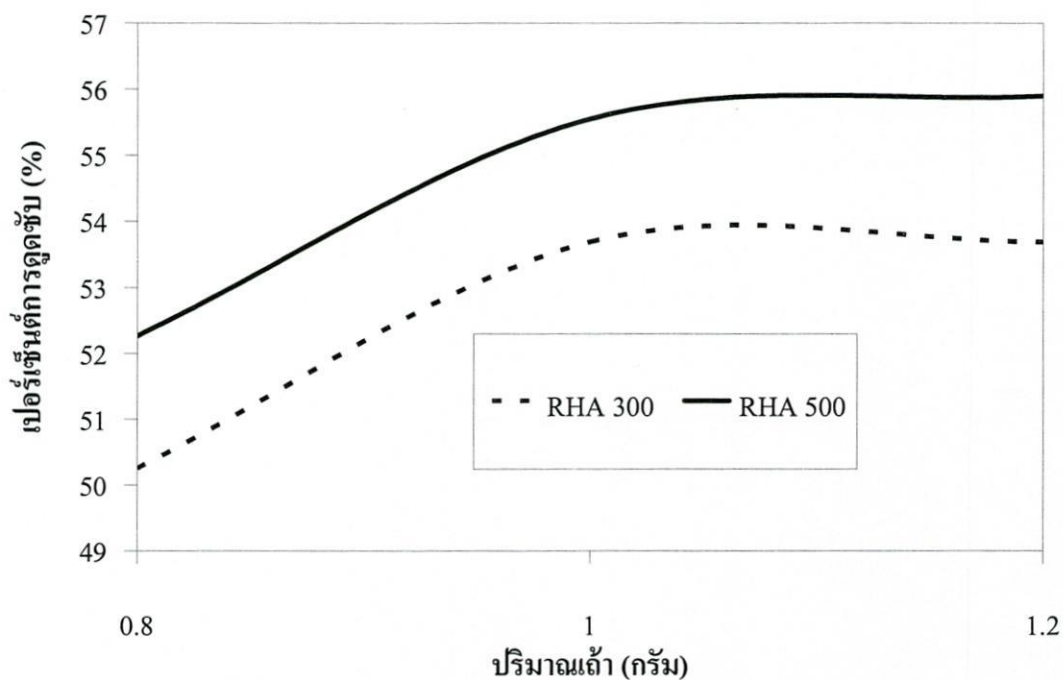
3.6 การดูดซับสารละลาย

3.6.1 ปริมาณเถ้าที่ใช้ในการดูดซับ (Amount of dosage)

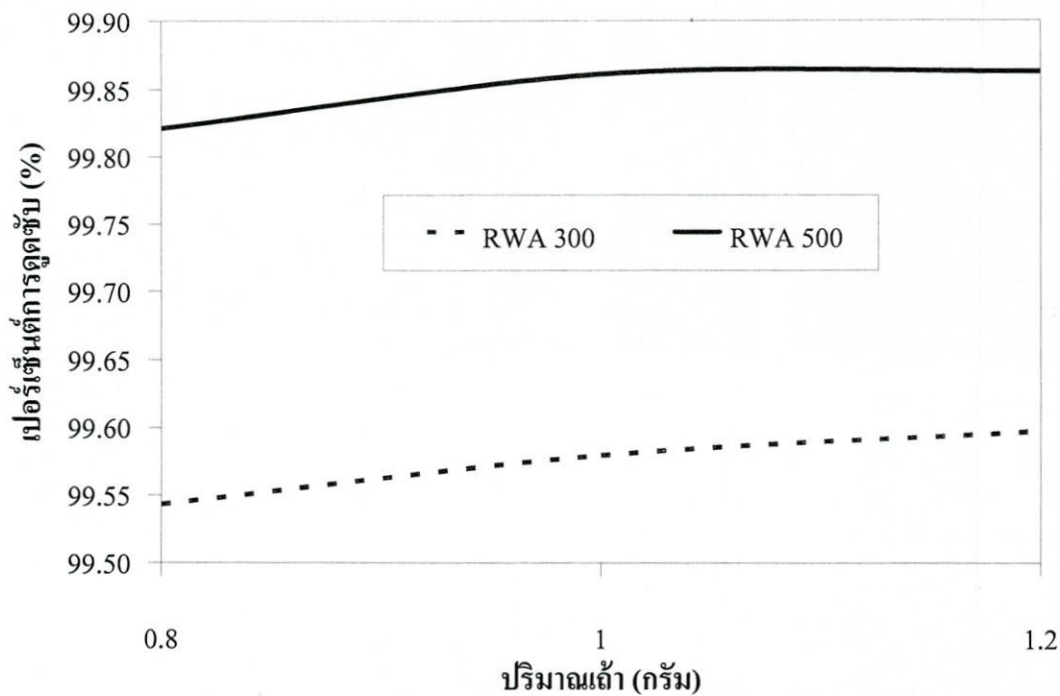
สารละลายโลหะหนักนิกเกิล (Ni)

จากการแปรผันปริมาณตัวดูดซับด้วยเถ้าแกลบ (รูปที่ 3.3) และเถ้าไม้ยางพารา (รูปที่ 3.4) จะเห็นว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับที่เป็นเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณเถ้าที่ 1 กรัมเป็นปริมาณที่

เหมาะสมต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณที่ 1.2 กรัม ค่าการดูดซับจะมีแนวโน้มที่คงที่ จากผลการทดลองใช้ตัวดูดซับที่เป็นถ้ำเกลบ (รูปที่ 3.3) สามารถทำการดูดซับสารละลายนิกเกิลในช่วง 50-56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้ำเกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับสูงกว่าถ้ำเกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ต่างกันร้อยละ 6 สำหรับตัวดูดซับที่เป็นถ้ำไม้ยางพารา(รูปที่ 3.4) ปริมาณที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 1 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร สามารถทำการดูดซับสารละลายนิกเกิลในช่วง 99.55-99.85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้ำไม้ยางพาราที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับสูงกว่าถ้ำไม้ยางพาราที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ต่างกันร้อยละ 0.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำเกลบกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

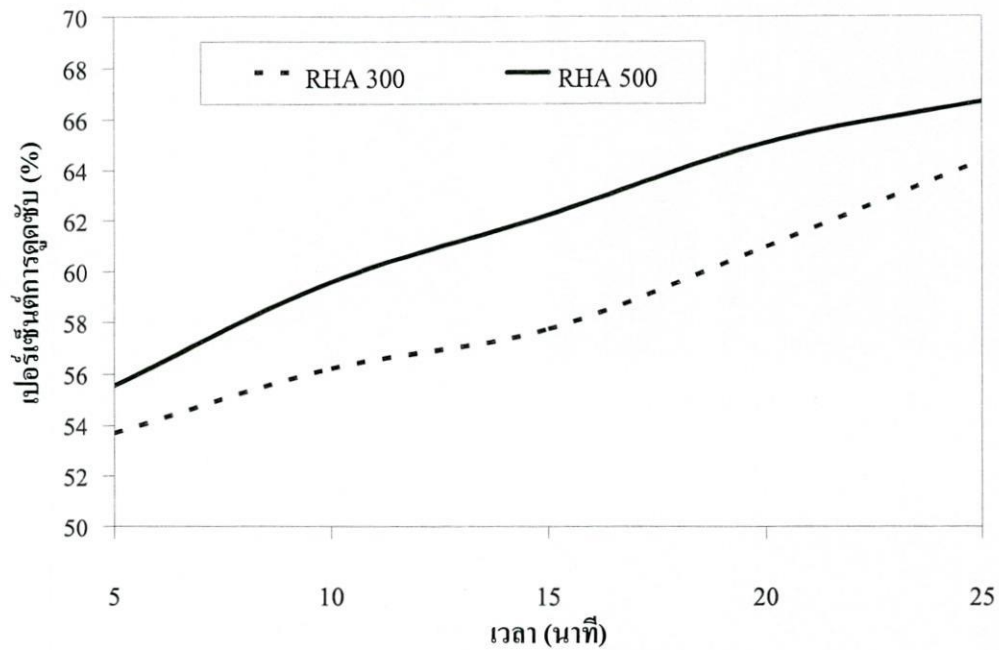


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเงินไม่ยางพารากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

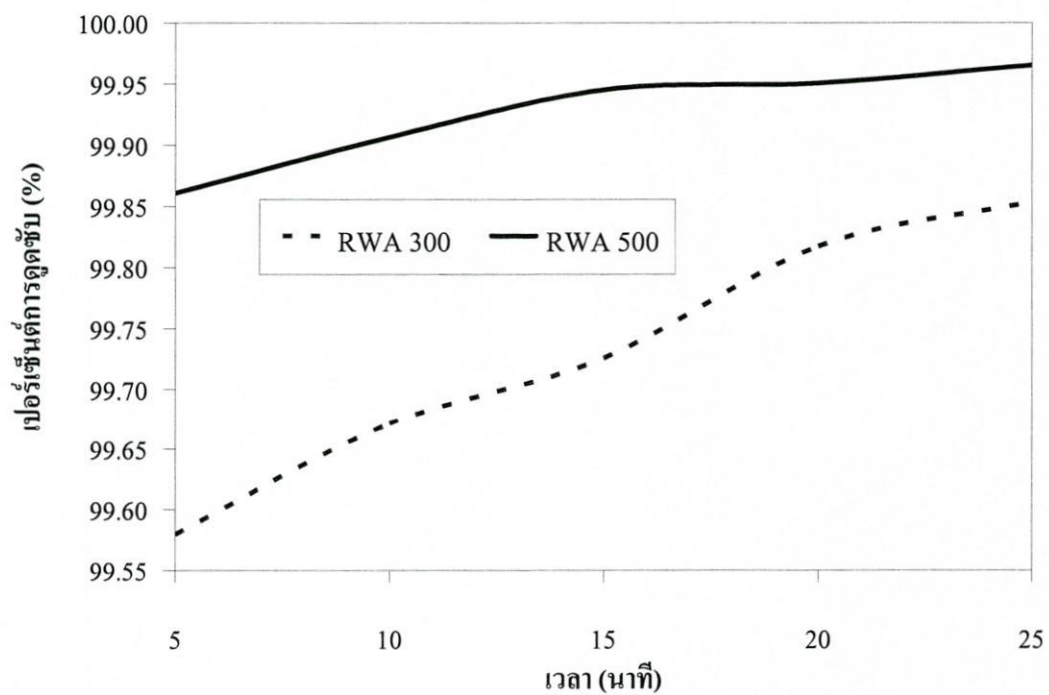
3.6.2 เวลาในการดูดซับ

สารละลายโลหะหนักนิกเกิล (Ni)

จากการแปรผันปริมาณตัวดูดซับในการทดลองที่ได้ผลข้างต้นแล้วจะใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร จากผลการทดลองที่ได้แปรผันเวลาในการดูดซับ ตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จะมีการดูดซับในช่วง 54-66 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.5) ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 นาที มีค่าการดูดซับสูงถึง 66 เปอร์เซ็นต์ สำหรับถ่านไม่ยางพารามีค่าการดูดซับในช่วง 99.60-99.95 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.6) ซึ่งถ่านไม่ยางพาราที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับสูงกว่าที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และที่เวลา 25 นาที มีค่าการดูดซับที่ 99.95 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มอัตราการดูดซับจะคงที่ สำหรับการดูดซับสารละลายโลหะหนักที่เป็นนิกเกิลถ่านไม่ยางพาราจะมีการดูดซับที่ดีกว่าถ่านกัมมันต์และที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับที่ดีกว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่ 25 นาที เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่ดูดซับดีที่สุดและมีแนวโน้มที่จะคงที่



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ่านกัลบ

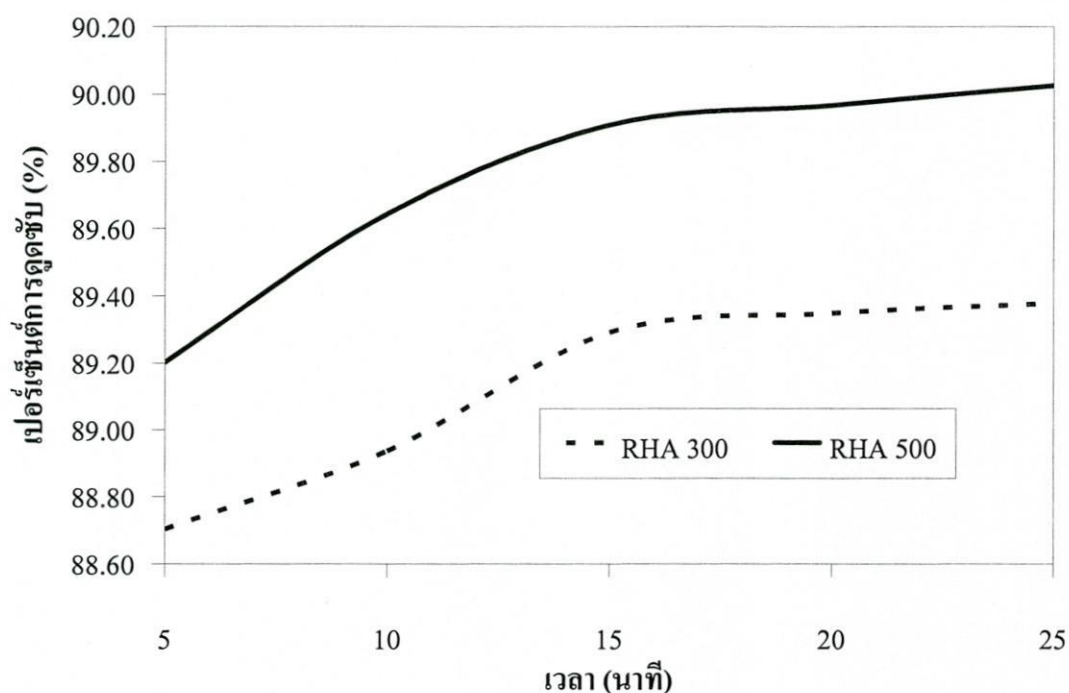


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ่านไม้ยางพารา

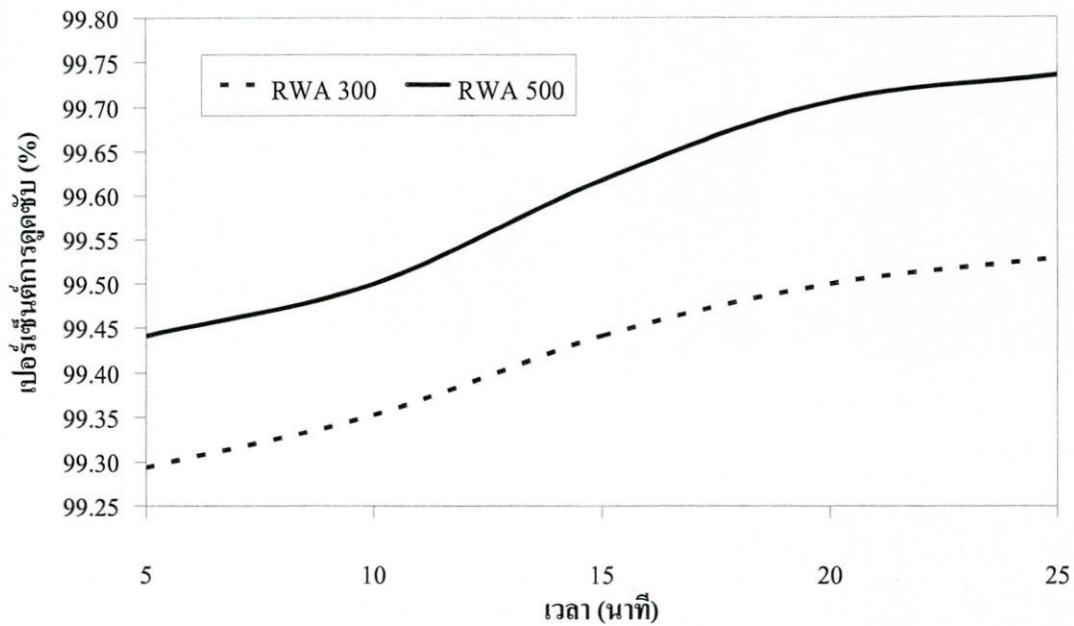
สารละลายโลหะหนักทองแดง (Cu)

จากผลการทดลองที่ได้แปรผันเวลาในการดูดซับ ตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัลบจะมีการดูดซับในช่วง 88.60-90.00 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.7) ซึ่งถ่านกัลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

จะมีการดูดซับสูงกว่าถ้ำเกลือที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 นาที มีค่าการดูดซับสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับถ้ำไม่ย่างพารามีค่าการดูดซับในช่วง 99.30-99.75 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.8) ซึ่งถ้ำไม่ย่างพาราที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับสูงกว่าที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และที่เวลา 25 นาที มีค่าการดูดซับที่ 99.75 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มอัตราการดูดซับจะคงที่ สำหรับการดูดซับสารละลายโลหะหนักที่เป็นทองแดงถ้ำไม่ย่างพาราจะมีการดูดซับที่ดีกว่าถ้ำเกลือและที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับที่ดีกว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่ 25 นาที เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่ดูดซับดีที่สุดและมีแนวโน้มที่จะคงที่



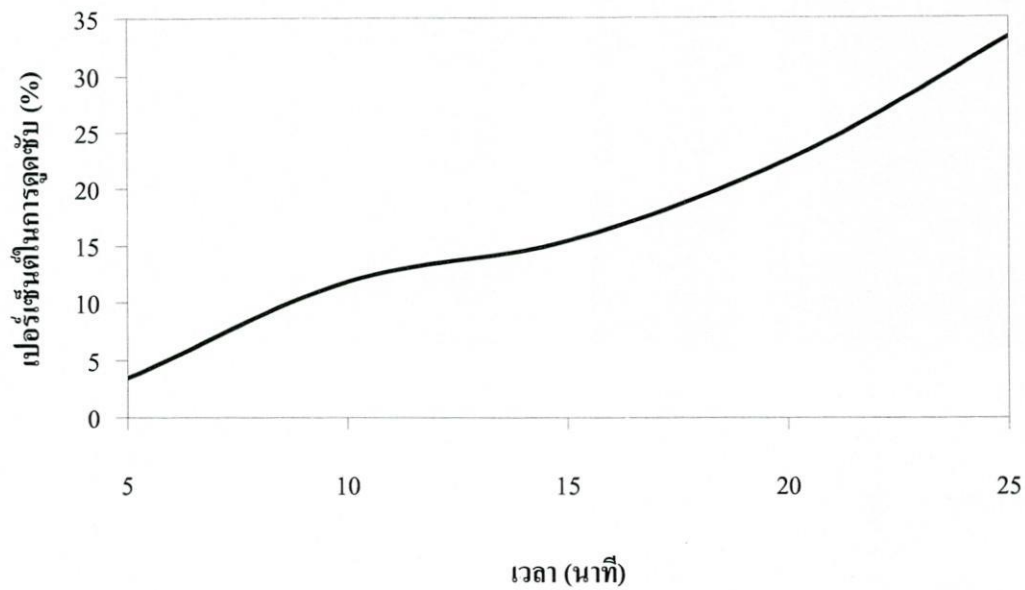
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ้ำเกลือ



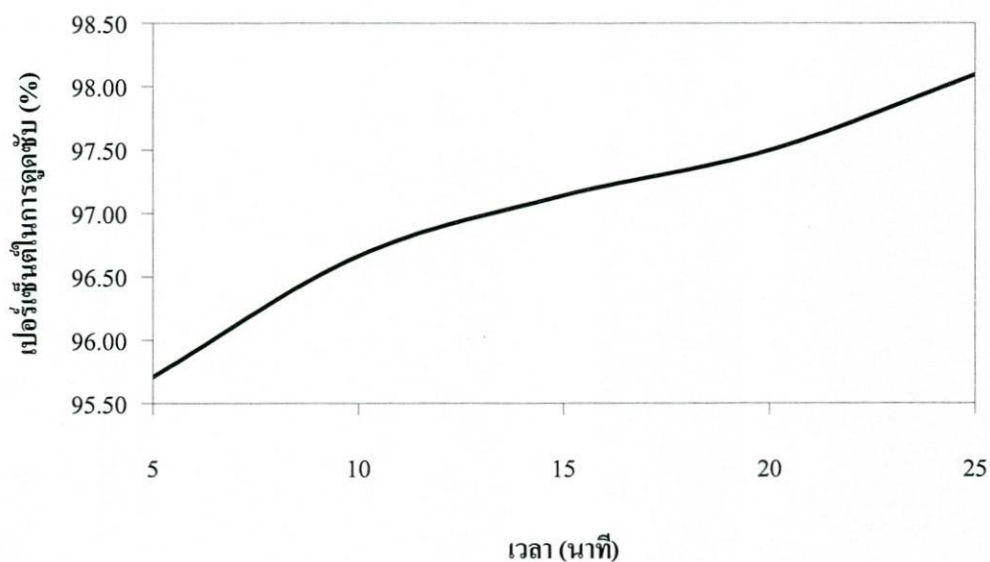
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ่านไม้ยางพารา

สารละลายโลหะหนักเหล็ก (Fe)

จากผลการทดลองการดูดซับสารละลายโลหะหนักนิกเกิลและทองแดงที่ผ่านมาสรุปได้ว่า ถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการดูดซับได้ดีกว่าถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จึงได้ทำการดูดซับโลหะหนักที่เป็นสารละลายของเหล็กใช้เฉพาะถ่านแกลบและถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3.9 กับ 3.10) จากผลการทดลองพบว่าถ่านแกลบจะมีการดูดซับในช่วง 6-35 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.9) ที่ระยะเวลาในการดูดซับ 5-25 นาที ซึ่งการดูดซับของถ่านไม้ยางพารามีอัตราการดูดซับที่สูงกว่าซึ่งอยู่ในช่วง 95-98 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.10) ที่ระยะเวลาในการดูดซับ 5-25 นาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่ 25 นาที เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่มีแนวโน้มยังสามารถดูดซับได้อีก



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถากล้วย



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเถาไม้ยางพารา

3.7 การวิเคราะห์เฟสทางเคมีของเถาไม้ยางพารา

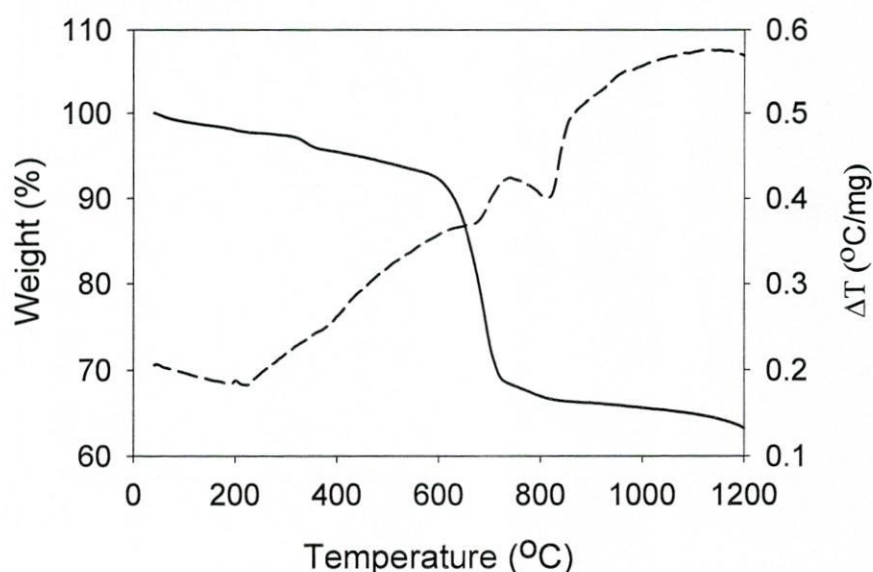
จากผลการทดลองดังที่กล่าวมาปรากฏว่าเถาไม้ยางพาราที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ดีกว่าเถากล้วย ดังนั้นจึงได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ธาตุว่าเถาไม้ยางพารามีปริมาณสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตสูง (ตารางที่ 3.6) ซึ่งถ้าวัตถุดิบที่ส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตสูง การเผาที่อุณหภูมิสูงแล้วจึงมีน้ำหนักเบาและอาจจะมีความพรุนอยู่ด้วย เนื่องจากการขยายตัวอันเป็นผลมาจากการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดันแก๊สลอดออกมา ที่มาจากการสลายตัวของแคลไซต์ (รูปที่ 3.11) และ

ตารางที่ 3.6 แร่ประกอบของเถาไม้ยางพารา ด้วย XRD

ชนิดของแร่ (%)	เถาไม้ยางพารา
แคลไซต์ (CaCO_3)	12.35
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO)	12.18
เพอริเคลส (MgO)	0.46
โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	8.41
ควอตซ์ (SiO_2)	0.92
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$)	25.40
โพแทสเซียมฟอสเฟต ($\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_8$)	16.23
โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)	9.79
แคลเซียมแมงกานีสออกไซด์ (CaMnO_2)	14.41

3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเถาไม้ยางพารา

ผลวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ (Thermogravimetric Analysis: TGA) (รูปที่ 3.12) จะเห็นว่าเถาไม้ยางพาราจะมีการสูญเสีย น้ำหนักที่อุณหภูมิ 39.38°C, 164.55°C, 319.93°C, 408.49°C, 642.21°C และ 755.16°C เป็น 1.84%, 1.03%, 2.03%, 2.22% และ 1.89% ตามลำดับ และผลวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์เครื่อง (Differential Thermal Analyzer: DTA) ของวัตถุดิบเถาไม้ยางพาราเกิดปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 352.24°C, 432.33°C, 742.87°C และ 1091.7°C ปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนที่ อุณหภูมิ 1189.73°C (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของวัตถุดิบเถาไม้ยางพารา (Thermogravimetry Analyzer and Differential Thermal Analyzer)

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

การวิจัยนี้ได้ใช้ถ้ำเกลือและถ้ำไม้ยางพาราในการดูดซับสารละลายโลหะหนักคือนิกเกิล ทองแดง และเหล็ก ซึ่งพบว่ามียุทธวิธีผลต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้

4.1.1 ชนิดของตัวดูดซับ

ถ้ำไม้ยางพารามีอัตราการดูดซับที่ดีกว่าถ้ำเกลือเนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่ตรวจพบในด้านของความพรุน ความหนาแน่น และขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าถ้ำเกลือส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ้ำเกลือ

4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิในการเผาถ้ำที่ 500°C จะทำให้เกิดการดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ดีกว่าอุณหภูมิในการเผาถ้ำที่ 300°C อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้สารอินทรีย์ต่างๆ ได้สลายตัวไปทำให้เกิดการดูดซับที่ดี หากนำถ้ำไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

4.1.3 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณตัวดูดซับที่ 1 กรัมต่อ สารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตรเกิดการดูดซับที่เหมาะสม เพราะเมื่อเติมปริมาณถ้ำมากกว่านี้การดูดซับมีแนวโน้มคงที่

4.1.4 อิทธิพลของความเร็วในการกวน

ความเร็วในการกวนสารละลายให้สัมผัสกับตัวดูดซับที่ 400 รอบต่อนาที เป็นความเร็วที่เหมาะสมในการดูดซับเนื่องจากถ้ำที่ใช้ในการดูดซับสามารถสัมผัสกับสารละลายได้เหมาะสม

4.1.5 อิทธิพลของเวลาในการดูดซับ

เวลาในการดูดซับสารละลายโลหะหนักซึ่งขึ้นอยู่กับสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิด จากผลการทดลองสารละลายโลหะหนักนิกเกิล และทองแดงมีแนวโน้มจะคงที่ ที่ระยะเวลา 25 นาที แต่สารละลายโลหะหนักของเหล็กมีแนวโน้มที่จะมีอัตราการดูดซับได้อีกเมื่อผ่านไป 25 นาที

4.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้เถาเถาและเถาไม้ยาวพารานั้นเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกในการบำบัดน้ำที่มีสารละลายโลหะหนักปนเปื้อนซึ่งเถาไม้ยาวพาราสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าเถาเถาซึ่งเถาทั้งสองชนิดนี้เป็นผลพลอยได้จากภาคการเกษตรและโรงงานอุตสาหกรรมสามารถหาได้เกือบทุกภาคของประเทศ ในการวิจัยนี้เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมทางด้านอุณหภูมิ ปริมาณ เวลา ความเร็วในการกวน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานหรือสถานประกอบการที่ทิ้งน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต่างๆ ทั้งนี้หากมีการวิจัยในอนาคตก็สามารถนำเถาตัวอื่นๆ ไปประยุกต์ใช้ได้ และควรศึกษาด้วยว่าอัตราในการดูดซับของเถาแต่ละชนิดอยู่ในประเภทการดูดซับประเภทใดด้วย

บรรณานุกรม

- ชานนท์ มากสิน, สมฤทัย ทองเจิม และจันทร์เพ็ญ นพเก้า. 2546. เปลือกมังคุดกับการดูดซับสารตะกั่ว. การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
- คณพล ตันนโยภาส และมาหามะฮ์ไฮมี มะแซ, 2550. การพัฒนาเนื้อกระเบื้องด้วยเศษหินแกรนิตและ เถ้าไพลล์น้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา
- บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. 2552. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เถ้าแกลบของเหลือสารพัด ประโยชน์
- ประจวบ ฉายบุญ และ บัญชา ขวาลไชย. 2547. การใช้เปลือกกล้วยเป็นสารดูดซับไอออนของโลหะ แคดเมียมและตะกั่วในสารละลาย.
- ปริญทร เต็มญารศิริป. 2551. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง และไผ่หนามจุ. บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- มันสิน ตันจุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
- ศูนย์เครือข่ายบริการทดสอบ วิเคราะห์ วิจัยด้านอุตสาหกรรม. Food (Amendment) Regulations. 2011. <http://www.tsnc.in.th> และ <http://www.thaieditorial.com>
- Alluri, HK., et al. 2007. Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. *African Journal of Biotechnology*, 6(25): 2924-2931.
- Amuda, O.S., Giwa, A.A., Bello, I.A. 2007. Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. *Biochemical Engineering Journal*, 36: 174–181.
- Antanaitis, D., and Antanaitis, A. 2004. Migration of heavy metals in soil and their concentration in sewage and sewage sludge. *EKOLOGIJA*, 1:42-45.
- Apichat, I., Eakachai, P. 2010. Humic acids removal from water by aminopropyl functionalized rice husk ash. *Journal of Hazardous Materials*, 184: 775–781.
- Cheremisinooff. P.N. and A.C. Morresi. 1987. Carbon adsorption application. In P.N. Cheremisinooff and F. Ellerbusch (eds), *Carbon adsorption handbook*. Michigan: Ann Arbor Science.

- Culp, G.L. and R.L. Culp. 1974. New concept in water purification, New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Department of Chemistry. Surface Analysis Facility. University of Oxford. 1990. Basic operation principles of the sorptometric. Available-source:<http://saf.chem.ox.ac.uk/Instruments/BET/sorpopprin.html>
- Dongmin, A., Yupeng, G., Yanchao, Z., Zichen, W. 2010. A green route to preparation of silica powders with rice husk ash and waste gas. *Chemical Engineering Journal*, 162:509–514.
- Francisco, W.S., André, G.O., Jefferson, P.R., Morsyleide, F.R., Denis, K., Ronaldo, F.N. 2010. Green coconut shells applied as adsorbent for removal of toxic metal ion using fixed-bed column technology. *Journal of Environmental Management*, 91:1634-1640.
- Helen K.M., Karthikeyan, T., Rajgopal, S., Lima, R.M. 2005. Kinetic and isotherm studies of Cu(II) adsorption onto H₃PO₄-activated rubber wood sawdust. *Journal of Colloid and Interface Science*, 292:354–362.
- Liang, S., Guo, X.Y., Feng, N.C., Tian, Q.H. 2010. Effective removal of heavy metals from aqueous solutions by orange peel xanthate. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20: 187-191.
- Mohsen, G., Mohammad, S.L., Hossein, E. 2011. Application of polyaniline nanocomposite coated on rice husk ash for removal of Hg(II) from aqueous media. *Synthetic Metals*, 161:1430–1433.
- Pengfei, Z., Xin, G. 2010. Removal of elemental mercury by iodine-modified rice husk ash sorbents. *Journal of Environmental Sciences*, 22(10): 1629–1636
- Qingge, F., Qingyu, L., Fuzhong, G., Shuichi, S., Masami, S., 2004. Adsorption of lead and mercury by rice husk ash. *Journal of Colloid and Interface Science*, 278: 1–8.
- Shameem, H., Mohd. Ali, H., Bhaskar, S.G. 2000. Adsorption of Ni(SO₄) on Malaysian rubber-wood ash. *Bioresource Technology*, 72:153-158.
- Srinivasakannan, C., Mohamad Zailani, A.B. 2004. Production of activated carbon from rubber wood sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 27:89 – 96.
- Tarun, K.N., Ashim, K.B., Sailendranath, M., Sudip, K.D. 2009. The sorption of lead(II) ions on rice husk ash. *Journal of Hazardous Materials*, 163:1254–1264.

- Teixeira, ST., Melo, WJ., Sila, ET. 2005. Heavy metals in a degraded soil treated with sludge from water treatment plant. *sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62(5):498-501.
- Vimal, C.S., Indra, D.M., Indra, M.M. 2006. Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption kinetics of metal ions from aqueous solution onto RHA. *Journal of Hazardous Materials B*, 134: 257–267.
- Vimal, C.S., Indra D.M., Indra, M.M. 2009. Competitive adsorption of cadmium(II) and nickel(II) metal ions from aqueous solution onto rice husk ash. *Chemical Engineering and Processing*, 48: 370–379.
- Vimal, C.S., Indra D.M., Indra, M.M. 2008. Removal of cadmium(II) and zinc(II) metal ions from binary aqueous solution by rice husk ash. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 312:172–184.
- Wan Ngah, W.S., Hanafiah, M.A.K.M. 2008. Adsorption of copper on rubber (*Hevea brasiliensis*) leaf powder: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Biochemical Engineering Journal*, 39: 521–530.
- Woranan, N., Bernard, G., Paitip, T. 2007. Copper adsorption on rice husk derived materials studied by EPR and FTIR. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 304:7–13.
- Yao, K.M. 1971. Removal of particulate matter by filtration. *Environmental Science Technology*, 5(11): 378-382
- Yue, C., Yanchao, Z., Zichen, W., Ying, L., Lili, W., Lili, D., Xiaoyan, G., Yuejia, M., Yupeng, G. 2011. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process—A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 163:39–52.

ภาคผนวก

Environment and natural resources journal

บทความที่ได้อ่านและตีพิมพ์ในวารสาร

การพิมพ์

Application of rubber wood ash for removal nickel and copper from aqueous solution

Mahamasuhaimi Masae^{1*}, Lek Sikong², Peerawas Kongsong², Phatcharee Phoempoon, Surasit Rawangwong¹, Witthaya Sririkun¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

*Corresponding Author: susumeme1983@yahoo.com

Abstract

An attempt at of this study was to use the rubber wood ash (RWA), an agricultural waste, as an adsorbent for the adsorption of Ni(II) and Cu(II) ions from aqueous solution. Studies were carried out as a function of rotating speed, amount of dosage and contact times. RWA is found to be a suitable adsorbent for the adsorption of nickel and copper ions. The RWA were investigated in terms of morphology and chemical composition using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray fluorescence (XRF) techniques. Optimum conditions for Ni(II) and Cu(II) ions removal were found to be adsorbent dosage of 10 g/L, 20 minutes equilibrium time and rotating speed of 400 rpm.

Key word: Adsorption/ Heavy metal/ Removal/ Rubber wood ash (RWA)

1. Introduction

The presence of heavy metals in aqueous water streams has become a problem due to their harmful effects on human health. It is recognized that finding methods for removal of heavy metals from aqueous water is of great importance. Nickel and copper are among the heavy metals affecting the environment.

Nickel and copper, are element which have been widely used in many products for consumer, industrial, military, transport/aerospace, marine and architectural applications. However, these can be regarded as a longstanding environmental contaminant. It has been reported that excessive intake of copper by humans may lead to severe mucosal irritation, hepatic and renal damage, capillary damage, gastrointestinal irritation and central nervous system irritation (Larous et al., 2005). Nickel and copper can be removed by precipitation as nickel and copper hydroxide but this method is only efficient at high pH value. Other conventional methods which have been employed to remove nickel and copper in wastewater include ion-exchange, membrane separation, electrochemical treatment, reverse osmosis and solvent extraction (Cheung et al., 1997). All these methods are generally expensive; therefore it is important to search for a low-cost method which is effective and economic. Adsorption technique is much preferred for removal of heavy metals because of its efficiency and low cost. The use of activated carbon (AC) as an adsorbent has now been regarded as a major process for wastewater treatment. However, due to high cost and about 10–15% loss during AC regeneration, non-conventional and cheap adsorbents like waste tea leaves (Tee et al., 1998), sago waste (Quek et al., 1998), peanut hulls (Brown et al., 2000), hazel nut shell (Cimino et al.,

2000), saw dust (Sukla et al., 2002), neem bark (Naiya et al., 2008), chitin beads (Zhou et al., 2004), thermally treated rice husk ash (Doner et al., 2004), waste banana, orange peels (Annadurai et al., 2003), cocoa shells (Meunier et al., 2003), tree fern (Ho et al., 2003), coffee residue (Boonamnuyvitaya et al., 2004), rice husk (Chuah et al., 2005; Feng et al., 2004), palm kernel fibre (Ho et al., 2005), olive stone waste (Fiol et al., 2006), grape stalk (Martinez et al., 2006), coir (Quek et al., 1998; Conrad et al., 2007), tea waste (Amarasinghe et al., 2007), bagasse fly ash (Gupta et al., 1998; Gupta et al., 2004), etc. have been used as alternative adsorbents.

Rubber wood is wood from the Pará rubber tree (*Hevea brasiliensis*). There are extensive plantations with these trees in Southeast Asia. For instance, the traditional practice was to burn the tree at the end of its latex-producing cycle. Rubber wood is used only after it completes its latex producing cycle, generally when it is 25–30 years old. When the latex yields become extremely low, the trees are then felled, and new ones are usually planted. It can also be used as fuel, either in a furnace, generator, or with a steam boiler powered. It may also be smelted into charcoal, with that fuel being used where appropriate. Rubber wood ash (RWA) is an abundant agricultural waste, accounting for about of the annual gross rubber wood ash, 217 million metric tons in Thailand (Office of agricultural economics, Thailand, 2013). Due to growing concern with environment pollution, and the need to conserve energy and resources, efforts have been made to burn rubber wood under controlled temperature and atmosphere as supplementary cement material.

The main purpose of this paper is to study the removal of nickel and copper ions by using adsorption and to determine the ability of RWA to remove of nickel and copper ions from aqueous solution. Also effects of adsorbent dosage, contact time and the rotating speed variation are investigated.

2. Experimental

All the chemical reagent used in the experiments were of analytical grade. Aqueous solutions of Ni(II) and Cu(II) ions were prepared from $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ and $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{Cu}$, respectively. Deionized water was used throughout the study.

2.1. Rubber wood ash treatment and analysis

Rubber wood ash is a by-product generally obtained from steam boiler and a solid obtained after burning of rubber wood. The morphology of RWA particles was investigated with the scanning electron microscope (SEM; JEOL JSM-5800LV). Particle size distribution of RWA were characterized by Beckman Coulter (Mastersizer 2000 Version 5.1). The specific surface area of the adsorbent was determined by Brunauer-Emmett-Teller (BET) method. X-ray fluorescence (XRF) analysis was carried out to determine chemical compositions of RWA. The RWA was supplied by the Songkhla region (South of Thailand). Samples of RWA were heated at the temperature of 500°C with the holding time of 1 h under a heating rate of 10°C/min.

2.2. Batch adsorption experiment

A 100 mL of solution were added to the beaker containing of the desired adsorbent. At the end of predetermined time intervals, the concentration of Ni(II) and Cu(II) was determined. All experiments were carried out three time and the adsorbed nickel and copper ions concentrations given were the means of duplicate experimental

results. Experimental variables considered were initial concentration of Ni(II) and Cu(II) 50 ppm; contact time between RWA with Ni(II) and Cu(II) ion solution 5–25 min; dosage of RWA was between 0.6–1.2 g/100 mL. Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP -AES) was used for the analysis of Ni(II) and Cu(II) in aqueous solution. An aqueous solution of nickel and copper ions (the concentration of solution was 50 ppm), rotating time 15 min and amount of RWA 1 g/100 mL were used to study the effect of rotating speed on the sorption.

3. Results and discussion

3.1 Properties of RWA

SEM micrographs of the RWA indicated that the surface was highly irregular and porous in nature is shown in Fig. 1. Chemical composition of RWA and specific surface area are given in Table 1. The CaO was found to be the main content in RWA. The particle size distributions generated were characterized using D_{50} , which is the 50% passing size in the cumulative distribution. The particle size distribution in Fig. 2 shows that the original RWA presents a reasonably wide range of particle sizes, the RWA present values of D_{50} between 35.4 μm .

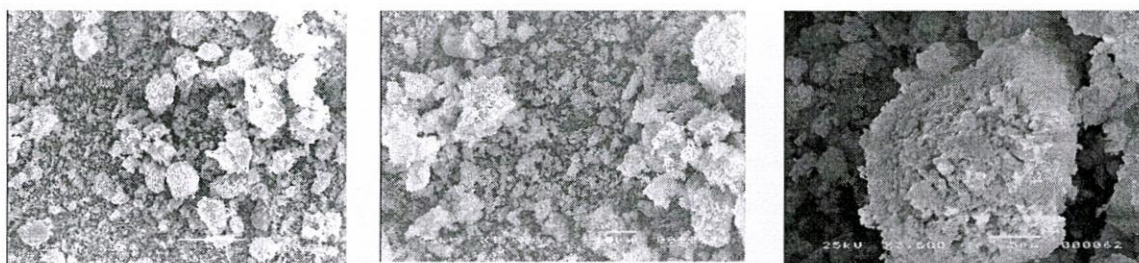


Figure 1 SEM Images of RWA at 500X (left), 1000X (middle) and 3500X (right).

Table 1 The chemical compositions (%) with X-ray fluorescence analysis and some properties of RWA

CaO	SiO ₂	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	Cl	SrO	LOI*
48.24	1.52	8.44	3.50	1.86	1.28	0.26	0.26	1.42	0.30	0.10	32.82
Specific surface area: 42 m ² /g											
* LOI – loss on ignition.											

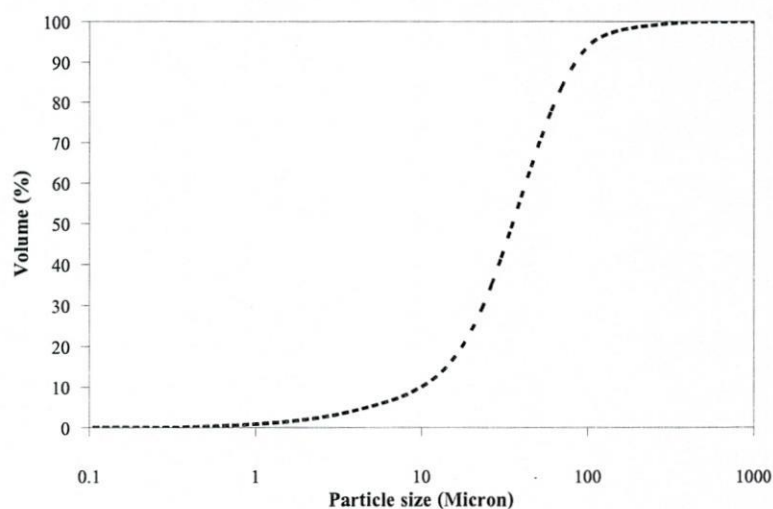


Figure 2 Particle size distribution of the RWA.

3.2 Influence of rotating speed

The rotating speed of the magnetic mixer for the sorption of nickel and copper ions onto sorbent was optimized at the range of 200 to 600 rpm. The results are shown in Fig. 3. The removal of nickel and copper ions increases with every increment in the rotating speed up to 400 rpm, thereafter a decrease is observed. The decrease in sorption of nickel and copper ions at very high speed may be due to the over agitation of the sorbate ions in the sorption vessel, as a result repulsion forces predominate on the sorptive sites on the sorbent surface, which ultimately reduce the attraction between sorbate and sorbent (Blinova et al., 2007). Therefore, 400 rpm was selected as an optimized rotating speed for further sorption studies.

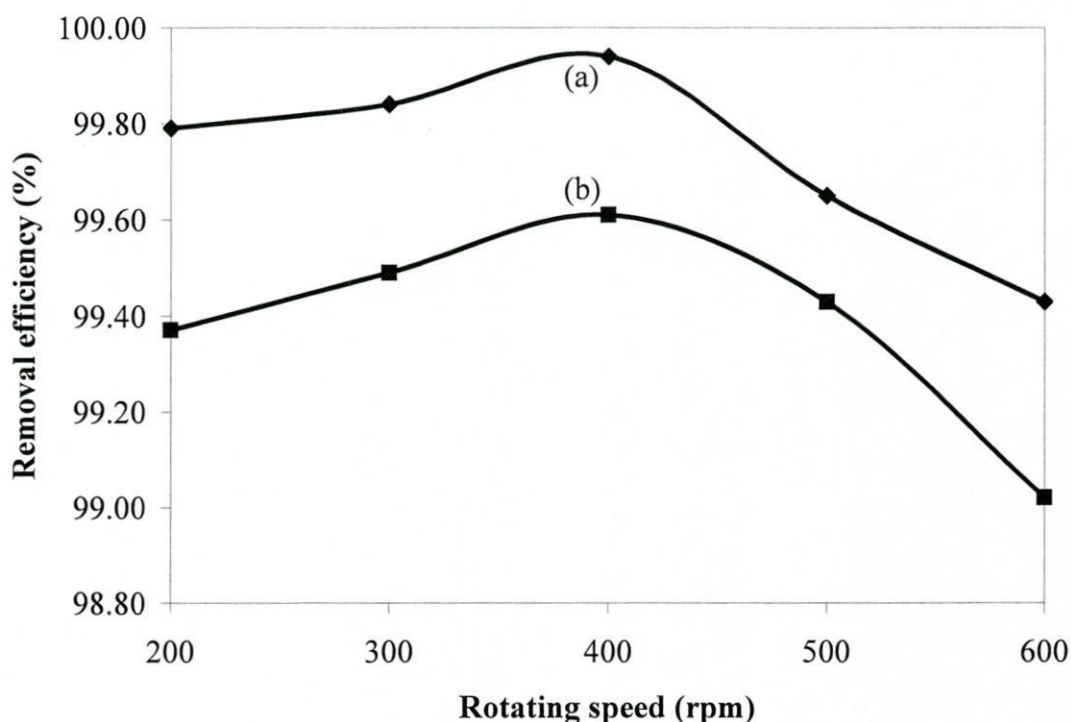


Figure 3 The effect of rotating speed on the removal efficiency of: (a) Ni(II) and (b) Cu(II) (with the initial concentration, pH, contact time, volume of solution and amount of adsorbent was 50 mg/L, 7, 15 min, 100 mL and 1 g, respectively).

3.3 Influence of sorbent dosage

The removal percentage of nickel and copper ions was studied by varying the adsorbent (RWA) dose between 0.6, 0.8, 1.0 and 1.2 g at nickel and copper ions concentration of 50 mg/L. Results are presented in Fig. 4. The Ni(II) and Cu(II) removal efficiency increases up to an optimum dosage beyond which the removal efficiency does not change. This result was anticipated because for a fixed initial solute concentration, increasing adsorbent doses provides greater surface area and more adsorption sites, whereas the adsorbed metal ions quantity per unit weight of the sorbent decreased by increasing the magnetic beads quantity. At very low adsorbent concentration, the adsorbent surfaces become saturated with the metal ions and the residual metal ion concentration in the solution was high.

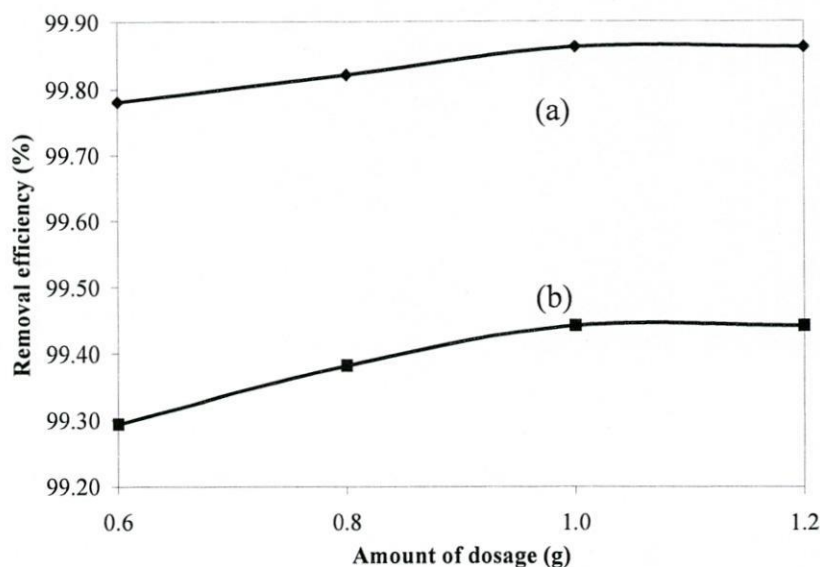


Figure 4 The effect of adsorbent dosage on the removal efficiency of: (a) Ni(II) and (b) Cu(II) (the initial concentration, rotating speed, pH, contact time and volume of solution was 50 mg/L, 400 rpm, 7, 15 min and 100 mL, respectively).

3.4 Effect of contact time

Fig. 5 shows the effect of contact time on sorption of nickel and copper ions by RWA. For these cases, initial nickel and copper ions concentration was 50 mg/L and pH of 7 was used for nickel and copper solution. Also RWA dose of 1 g added in 100 mL and pH of 10 were used. For Ni(II) and Cu(II) sorption rate reaches up to 99.86% and 99.44%, respectively, when contact time was 20 min, and then little change of sorption rate was observed. This result revealed that adsorption of nickel and copper was fast and the equilibrium was achieved after 20 min of contact time. Taking into account these results, a contact time of 20 min was chosen for further experiments.

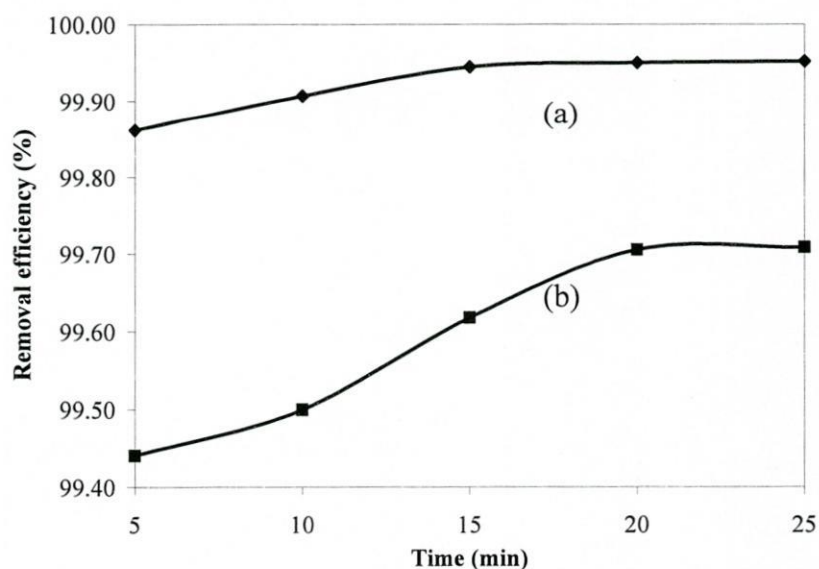


Figure 5 The effect of contact time on the removal efficiency of: (a) Ni(II) and (b) Cu(II) (the initial concentration, rotating speed, pH, volume of solution and amount of adsorbent was 50 mg/L, 400 rpm, 7, 100 mL and 1 g, respectively).

4. Conclusions

In this research can be summarized that an agricultural waste, rubber wood ash, was found to be a suitable adsorbent for the adsorption of nickel and copper ions from aqueous water. Optimum conditions for nickel and copper ions removal were found to be adsorbent dosage of 10 g/L, equilibrium time 20 min and rotating time 400 rpm. Adsorption capability of RWA for nickel and copper ions are considerably higher and faster, respectively, than many other methods.

5. Acknowledgements

This study was supported by "Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand". The authors wish to thank Assoc.prof. Dr. Lek Sikong, Lecturer at the Prince of Songkla University, for his constructive discussions and great help on this study.

6. References

- Amarasinghe, B.M.W.P.K. and Williams, R.A. 2007. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater, **Chemical Engineering Journal** 132 (1-3):299-309.
- Annadurai, G. Juang, R.S. and Lee, D.J. 2003. Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels, **Water Science Technology** 47(1): 185-190.
- Blinova, N.V. Stejskal, J. Trchova, M. Prokes, J. and Omastova, M. 2007. Polyaniline and polypyrrole: A comparative study of the preparation, **European Polymer Journal** 43 (6):2331-2341
- Boonamnuyvitaya, V. Chaiya, C. Tanthapanichakoon, W. and Jarudilokkul, S. 2004. Removal of heavy metals by adsorbent prepared from pyrolysed coffee residues and clay, **Separation and purification technology** 35(1):11-22.
- Brown, P. Jefcoat, I.A. Parrish, D. Gil, S. and Graham, E. 2000. Evaluation of the adsorptive capacity of peanut hull pellets for heavy metals in solution, **Advances in Environmental Research** 4 (1):19-29.
- Chuah, T.C. Jumasiah, A. Azni, I. Katayan, S. and Choong, S.Y.T. 2005. Rice husk as a potentially low-cost bio sorbent for heavy metal and dye removal: an overview, **Desalination** 175(3): 305-316.
- Cheung, C.W. Porter, C.F. and McKay, G. 1997. Sorption kinetics for the removal of copper and zinc from effluents using bone char, **Separation and Purification Technology** 19(99): 55-64.
- Cimino, G. Passerini, A. and Toscano, G. 2000. Removal of toxic cations and Cr(VI) from aqueous solution by hazelnut shell, **Water Research** 34 (11): 2955-2962.
- Conrad, K. and Hansen, H.C.B. 2007. Sorption of zinc and lead on coir, **Bioresource Technology** 98 (1):89-97.
- Doner, G. and Akman, S. The removal of copper, cadmium and lead by rice husk ash, **Fresenius Environmental Bulletin** 12 (Part 7):736-739.
- Feng, Q. Lin, Q. Gong, F. Sugita, S. and Shoya, M. 2004. Adsorption of lead and mercury by rice husk, **Journal of Colloid Interface Science** 274(1):1-8.
- Fiol, N. Villaessusa, I. Martinez, M. Miralles, N. Poch, J. and Serarols, J. 2006. Sorption of Pb(II), Ni(II), Cu(II) and Cd(II) from aqueous solution by olive stone waste, **Separation and purification technology** 50(1): (2006) 132-140.

Gupta, V.K. and Ali, I. 2004. Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste, **Journal of Colloid and Interface Science** 271(2):321–328.

Gupta, V.K. Mohan, D. and Sharma, S. 1998. Removal of lead from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste material, **Separation science and technology** 33(9): 1331–1343.

Ho, Y.S. and Ofomaja, A.E. 2005. Kinetic and thermodynamics of lead ion sorption on palm kernel fibre from aqueous solution, **Process Biochemistry** 40 (11): 3455–3461.

Ho, Y.S. Chiu, W.T. Hsu, C.S. and Huang, C.T. 2004. Sorption of lead ions from aqueous solutions using tree fern as adsorbent, **Hydrometallurgy** 73 (1-2): 55–61.

Larous, S. Meniai, A.H. and Lehocine, M.B. 2005. Experimental study of the removal of copper from aqueous solutions by adsorption using sawdust, **Desalination** 185 (1-3): 483–490.

Martinez, M. Miralles, N. Hidalgo, S. Fiol, N. Villaseca, I. and Poch, J. 2006. Removal of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solutions using grape stalk waste, **Journal of Hazardous Materials** 133(1-3): 203–211

Meunier, N. 2003. Lead removal from acidic solutions by the sorption on cocoa shells: effect of some parameters, **Journal of Environmental Engineering ASCE** 129(8):693–698.

Naiya, T.K. Bhattacharya, A.K. and Das, S.K. 2008. Adsorption of Pb(II) by saw dust and neem bark from aqueous solutions, **Environment progress** 27(3):313–328.

Office of agricultural economics, Thailand. 2013. Thailand's rubber wood forecast [Online]. Available: <http://www.oae.go.th> [Access on 3 May 2013]

Quek, S.Y. Al Duri, B. Wase, D.A.J. and Forster, C.F. 1998. Coir as a biosorbent of copper and lead, **Process Safety and Environmental Protection** 76 (B1):50–54.


Quek, S.Y. Wase, D.A.J. and Forster, C.F. 1998. The use of sawdust for the sorption of lead and copper, **Water SA** 24 (3): 251–256.

Sukla, A. Zhang, Dubey, Y.-H. P. Margrave, J.L. and Sukla, S.S. 2002. The role of saw dust in the removal of unwanted materials from water, **Journal of Hazardous Materials** 95(1-2):137–152.

Tee, T.W. and Khan, A.R.M. 1998. Removal of lead, cadmium and zinc by waste tea leaves, **Environment Technology Letters** 9(11): 1223–1232.

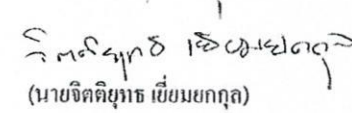
Xuan, Z. Tang, Y. Li, X. Liu, Y. and Luo, F. 2006. Study on the equilibrium, kinetics and isotherm of biosorption of lead ions onto pretreated chemically modified orange peel, **Biochemical Engineering Journal** 31(2):160–164.

Zhou, D. Zhang, L. Zhou, J. and Guo, S. 2004. Cellulose/chitin beads for adsorption of heavy metals in aqueous solution, **Water Research** 38(11): 2643–2650.

 <p>คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</p> <p><input type="checkbox"/> การประดิษฐ์</p> <p><input type="checkbox"/> การออกแบบผลิตภัณฑ์</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร</p> <p>ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้</p> <p>ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ.2522</p> <p>แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2535</p> <p>และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ.2542</p>	<p>สำหรับเจ้าหน้าที่</p>	
	<p>วันรับคำขอ 30 เม.ย. 2556</p>	<p>เลขที่คำขอ</p>
	<p>วันยื่นคำขอ 26 เม.ย. 2556</p>	<p>1303000462</p>
	<p>สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ</p>	
<p>ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์</p> <p>ประเภทผลิตภัณฑ์</p>		
<p>วันประกาศโฆษณา</p>		<p>เลขที่ประกาศโฆษณา</p>
<p>วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</p>		<p>เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</p>
<p>ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่</p>		
<p>1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์</p> <p>ตัวดูดซับสารละลายโลหะหนักที่ได้จากเถ้าชีวมวลและกรรมวิธีผลิตตัวดูดซับนี้</p>		
<p>2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่</p> <p>ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน</p>		
<p>3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย</p> <p>1 ค.บ่อยาง</p> <p>อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000</p>		<p>3.1 สัญชาติ ไทย</p> <p>3.2 โทรศัพท์ 0-7428-9322</p> <p>3.3 โทรสาร 0-7428-9339</p> <p>3.4 อีเมล jittiyut.y@psu.ac.th</p>
<p>4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</p> <p><input type="checkbox"/> ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้รับโอน <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น</p>		
<p>5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด ประเทศ รหัสไปรษณีย์)</p> <p>นายจิตติยุทธ เข็มมกกุล</p> <p>ศูนย์วิจัยสินทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์</p> <p>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 15 ถนนกาญจนาภิเษย์ อำเภอหาดใหญ่</p> <p>จังหวัดสงขลา 90110</p>		<p>5.1 ตัวแทนเลขที่ 2266</p> <p>5.2 โทรศัพท์ 074-289322</p> <p>5.3 โทรสาร 074-289339</p> <p>5.4 อีเมล jittiyut.y@psu.ac.th</p>
<p>6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)</p> <p>ดร.มาทามะสุโอะมิ มะแซ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และนายวิทยา ศิริคุณ อยู่ที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 1 ค.บ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 รองศาสตราจารย์ดร.เล็ก สีสง และนายทิวรัส คงสง</p> <p>ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 15 ถนนกาญจนาภิเษย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา</p> <p>90112</p>		
<p>7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม</p> <p>ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้อธิบายได้ว่าคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่</p> <p>วันอื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ</p> <p><input type="checkbox"/> คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง <input type="checkbox"/> ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ <input type="checkbox"/> ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ</p>		

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่วางระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้ โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่

แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

8. การยื่นคำขออนุญาตนำเข้า				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการ ประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอนี้ในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย <input type="checkbox"/> ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ <input type="checkbox"/> ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9. การแสดงการประดิษฐ์ หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง วันเปิดงานแสดง ผู้จัด				
10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ	10.2 วันที่ฝากเก็บ	10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ		
11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ที่จัดทำ เป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอขึ้นเป็นภาษา <input type="checkbox"/> อังกฤษ <input type="checkbox"/> ฝรั่งเศส <input type="checkbox"/> เยอรมัน <input type="checkbox"/> ญี่ปุ่น <input type="checkbox"/> อื่น ๆ				
12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ เดือน พ.ศ. <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ในการประกาศโฆษณา				
13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย ก. แบบพิมพ์คำขอ 2 หน้า ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์ 6 หน้า ค. ข้อถ้อยคำสิทธิ 1 หน้า ง. รูปเขียน รูป หน้า จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> รูปเขียน รูป หน้า <input type="checkbox"/> ภาพถ่าย รูป หน้า ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์ 1 หน้า		14. เอกสารประกอบคำขอ <input checked="" type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบ ผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ <input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ <input type="checkbox"/> เอกสารการขอเน้นวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่น คำขอในประเทศไทย <input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ <input type="checkbox"/> เอกสารอื่น ๆ		
15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน <input type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก.....				
16. ลายมือชื่อ (<input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร; <input checked="" type="checkbox"/> ตัวแทน) <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">  (นายจิตติยุทธ เข้มมยกุล) ตัวแทนผู้รับมอบอำนาจ </div>				

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นคำขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงาน
 เจ้าหน้าที่ เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล

นายมาหามะสุไฮมี มะแซ

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

-โครงการทุนศึกษากันกุลิณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551-2552

-ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University) ประจำปี 2551-2552

-โครงการทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551

-ทุนโครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนใต้ประจำปี 2552-2554

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayane Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito "Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO₂ films" *Advanced Materials Research Vols. 148-149 (2011) pp 1473-1479*

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae** , Kalayane Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito "Improvement of hydrophilic property of rubber dipping former surface with Ni/B/TiO₂ nano-composite film" *Applied Surface Science, Vol 258, (2012), Issue 10, pp4436-4443*

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Phatcharee Phoempoon, Surasit Rawangwong, and Witthaya Sririkun “Application of rubber wood ash for removal nickel and copper from aqueous solution” (Article in press, 2013, Environment and natural resources journal)

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayane Kooptarnond, Wirach Taweepreeda, Fumio Saito and Pitchaya Pitsuwan “Influence of nitrogen doped TiO_2 nano composite film on hydrophilic property of rubber dipping former surface” (Article in press, 2013)

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

Masae, M. Tonnayopas, D. Kooptarnond, K. “Development and investigation of granite waste tiles body incorporated with oil palm fiber ash” International Conference on Mining, Materials, and Petroleum Engineering: The Frontiers of Technology (ICFT-2007) Phuket, Thailand. 10-12 May 2007

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae**, Kalayane Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “The effect of B and Ni co-doped TiO_2 film coated on glass substrate” 4th International conference on recent advances in materials minerals & environment and 2nd Asian symposium on materials & processing (RAMM&ASMP 2009) Penang, Malaysia. 1-3 June 2009

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae**, Kalayane Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “Influence of Ni doping on photoactivity and hydrophilicity of TiO_2 composite film” 10th International seminar on environment & architecture, and 1st international conference on engineering, environment, economic, safety & health (10th SENVAR& 1st CONVEESH 2009) Sulawesi island, Indonesia. 26-27 October 2009

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayane Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO_2 films” 2010 International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP 2010) Shenzhen, China. 6-8 November 2010

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayane Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Improvement of photoactivity and hydrophilicity of rubber latex formers by B and Ni co-doped TiO_2 films” Commission on Higher Education Congress IV: University Staff Development Consortium (CHE-USDC Congress IV) Pattaya, Thailand. 14-16 September 2011

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayane Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito "Influence of Ni/B/N/TiO₂ nano composite film on hydrophilic property of rubber dipping former surface" 2012 International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering, Materials and Energy (ICFMEME 2012) Beijing, China December 20-21 2012

สิทธิบัตรและอนุสิทธิบัตร ฯลฯ

๑. จดสิทธิบัตร เรื่อง สารเคลือบแม่พิมพ์ไทเทเนียมไดออกไซด์และกรรมวิธีเคลือบสารเคลือบนี้ โดย เล็ก สีกอง กัลยาณี คุปตานนท์ **มาหามะฮูไฮมี มะแซ** และวิรัช ทวีปรีดา เลขที่คำขอ 1101000103 (18 มกราคม 2554)
๒. จดอนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีผลิตฟิล์มยางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่มโดย เล็ก สีกอง กัลยาณี คุปตานนท์ **มาหามะฮูไฮมี มะแซ** และวิรัช ทวีปรีดา เลขที่คำขอ 1103000475 (10 พฤษภาคม 2554) และได้รับอนุมัติการคุ้มครอง ตั้งแต่ 5 กันยายน 2554 ถึง 9 พฤษภาคม 2560
๓. จดอนุสิทธิบัตร เรื่อง เทียนไขเขียนผ้าบาติกและกรรมวิธีผลิตเทียนไขนี้ โดย **มาหามะฮูไฮมี มะแซ** เล็ก สีกอง พีรวัส คงสง ชูไฮดี สนิ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และพิชญ์ พิศสุวรรณ เลขที่คำขอ 1303000461 (30 เมษายน 2556)
๔. จดอนุสิทธิบัตร เรื่อง ตัวดูดซับสารละลายโลหะหนักที่ได้จากเถ้าชีวมวลและกรรมวิธีผลิตตัวดูดซับนี้ โดย **มาหามะฮูไฮมี มะแซ** เล็ก สีกอง พีรวัส คงสง สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และวิทยา ศิริคุณ เลขที่คำขอ 1303000462 (30 เมษายน 2556)
๕. จดอนุสิทธิบัตร เรื่อง การผลิตแคลเซียมฟอสเฟตจากเถ้าไม้ยางพาราและกรรมวิธีผลิตสารนี้ โดย **มาหามะฮูไฮมี มะแซ** เล็ก สีกอง กัลยาณี คุปตานนท์และพีรวัส คงสง (อยู่ในช่วงการยื่นจดอนุสิทธิบัตร)

รางวัลผลงานวิจัยที่ได้รับ

๑. โครงการเรื่อง กรรมวิธีผลิตฟิล์มยางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม ได้รับรางวัล Special Prize ด้านเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม ในงานวันนักประดิษฐ์ 2556 เมื่อวันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2556 จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ณ อิมแพค เมืองทองธานี
๒. รางวัลวิทยานิพนธ์ระดับดีมาก ประจำปี 2555 ระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

๓. รางวัลวิทยานิพนธ์ชมเชย ประจำปี 2555 ระดับปริญญาเอก กลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันนักวิจัยและนวัตกรรม ม.อ. ครั้งที่ 7 ประจำปี 2556

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. ชื่อโครงการวิจัย: การพัฒนาเนื้อกระเบื้องด้วยเศษหินแกรนิตและเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา, ผู้ร่วมโครงการ, โครงการทุนศึกษากันกฎคณะวิศวกรรมศาสตร์และโครงการทุนบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2549, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 300,000 บาท, ระยะเวลาโครงการ มี.ย. 2549 – ธ.ค. 2551, สถานภาพของโครงการ เสร็จแล้ว.
2. โครงการวิจัย: วัสดุเคลือบระดับนาโนที่ทำความสะอาดตัวเองได้สำหรับผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม, ผู้ร่วมโครงการ, ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University) ประจำปี 2551-2552 และทุนโครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนใต้ประจำปี 2552-2555, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 1,000,000 บาท, ระยะเวลาโครงการ มี.ย. 2551 – ธ.ค. 2554, สถานภาพของโครงการ เสร็จสิ้นแล้ว.
3. โครงการวิจัย: การพัฒนาคุณภาพการผลิตผ้าบาติกตามภูมิปัญญาท้องถิ่นในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2556, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 300,000 บาท, ระยะเวลาโครงการ ตุลาคม 2555 – กันยายน 2556, สถานภาพของโครงการ กำลังดำเนินการ
4. โครงการเรื่อง แบบขึ้นรูปถุงมือยางและถุงยางอนามัยที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปในโตรเจนและธาตุแอลคาไลน์ที่ทำความสะอาดตัวเองได้, หัวหน้าโครงการ, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2556, งบประมาณที่คาดว่าจะได้รับ 350,000 ระยะเวลา 1 ปี (กำลังพิจารณา)