การปรับสภาพผิวของเศษเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสเพื่อการดูดซับโลหะหนัก

นางสาวจีรารัตน์ ตาคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SURFACE TREATMENT OF BAMBOO FIBER SCRAP WITH LACCASE FOR HEAVY METAL ADSORPTION

Miss Jeerarat Takum

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับสภาพผิวของเศษเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสเพื่อการดูดซับโลหะหนัก
โดย	นางสาว จีรารัตน์ ตาคำ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรีรัตน์ จารุจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรีรัตน์ จารุจินดา)

…………………………………………… กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ นราพร หาญวจนวงศ์)

จีรารัตน์ ตาคำ : การปรับสภาพผิวของเศษเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสเพื่อการดูดซับโลหะหนัก. (SURFACE TREATMENT OF BAMBOO FIBER SCRAP WITH LACCASE FOR HEAVY METAL ADSORPTION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา, 83 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับสภาพผิวของเศษเส้นใยไผ่ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเครื่องเรือนด้วยแลกเคสเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการการปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆกัน 3 ภาวะ ได้แก่ 1) ที่อุณหภูมิ 4, 29 (อุณหภูมิห้อง) องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15, 30, 45 และ 60 ชั่วโมง และ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 30, 50 และ 70 นาที 2) ที่ปริมาณแลกเคส 0, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร และ 3) ที่ปริมาณรีซอร์ซินอล (ตัวกลางในการทำปฏิกิริยา) 0, 2, 4 และ 6 มิลลิลิตร จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยเทคนิค AAS พบว่าเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 3 ภาวะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี และตะกั่วสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงใกล้เคียงกับเส้นใยไผ่ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ เมื่อพิจารณาร้อยละสูงสุดในการดูดซับโลหะหนัก พลังงานที่ใช้ในการปรับสภาพและกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้ว การปรับสภาพผิวเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสเพียงอย่างเดียวโดยไม่เติมรีซอร์ซินอล ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 45 ชั่วโมง (B_x) เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นภาวะในการปรับสภาพผิวเส้นใยไผ่ดังกล่าวจึงถูกเลือกเพื่อใช้ในการศึกษาไอโซเทิร์มในการดูดซับและศึกษาผลของระยะเวลาที่เส้นใยไผ่ B_x สัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก โดยผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะตะกั่ว สังกะสี และทองแดงสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิก สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และจะเข้าใกล้สมดุลเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต..

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..............

ปีการศึกษา 2552

4972617023 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORDS : BAMBOO FIBER / HEAVY METALS / LACCASE / LIGNIN / ADSORPTION

JEERARAT TAKUM : SURFACE TREATMENT OF BAMBOO FIBER SCRAP WITH LACCASE FOR HEAVY METAL ADSORPTION. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. SIREERAT CHARUCHINDA, Ph.D. 83 pp.

The objective of this research was to treat the surface of bamboo fiber scrap from furniture industries with laccase for heavy metal (zinc, lead and copper) adsorption in synthetic wastewater. Three different conditions of surface treatment 1) at 4°C, 29 °C (room temperature) for 15, 30, 45 and 60 hours and 50 °C, 70 °C and 90 °C for 10, 30, 50 and 70 minutes 2) various amount of laccase at 0, 5, 10, 20 and 30 mL and 3) various amount of resorcinol (using as a mediator) at 0, 2, 4 and 6 mL were used to investigate the heavy metal adsorption efficiency of bamboo fiber. The analysis of heavy metal using atomic absorption spectroscopy (AAS) showed that the treated bamboo fiber from all conditions conducted in this study exhibited adsorption efficiency of zinc and lead better than that of the untreated one. However, the copper adsorption efficiency of the treated one was similar to the untreated one. When the highest percentage of heavy metal adsorption, the energy consumption, and the environmental in friendliness of the process were considered, the surface treatment of bamboo fiber with laccase only but without resorcinol at room temperature for 45 hours (B_x) was the most appropriate. Thus, this condition for surface treatment of bamboo fiber was selected to investigate the types of adsorption isotherms and also the effect of synthetic wastewater contact time on the efficiency of heavy metal adsorption. The results showed that the adsorption of lead, zinc and copper of the treated bamboo fiber related to the Langmuir and Freundich adsorption isotherms. In addition, the results exhibited that the adsorption efficiency of those 3 heavy metals increased with increasing of synthetic wastewater contact time and the adsorption equilibrium started to establish when contact time was 4 hours.

Department : Materials Science	Student's Signature ....
Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ อีกทั้งความเอื้อเฟื้อทางด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมี และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. ผศ.ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ และแนะแนวทางรวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผศ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช และ รศ.นราพร หาญวจนวงศ์ ประธานกรรมการและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. คุณ สมชาย พัฒนะประยูรวงศ์ บริษัท ฮันทส์แมน (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาแลกเคสเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้

4. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์วิจัยเฉพาะทางด้านวัสดุเซรามิกและพอลิเมอร์ขั้นสูง ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนเงินทุนบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัย

5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยรวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่น้องและเพื่อนๆ ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คุณธรรมจริยธรรมให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนผ่านอุปสรรคต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เส้นใยธรรมชาติ	4
2.2 เส้นใยลิกโนเซลลูโลส	4
2.2.1 เซลลูโลส	4
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส	5
2.2.3 ลิกนิน	5
2.3 เส้นใยไผ่	6
2.4 ไผ่ในประเทศไทย	8
2.5 โลหะหนัก	10
2.5.1 ตะกั่ว	11
2.5.2 ทองแดง	12
2.5.3 สังกะสี	13
2.6 กระบวนบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	14
2.6.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)	14

บทที่ หน้า

2.6.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) 15
2.6.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide precipitation) 15
2.6.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) 15
2.6.3 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction) 16
2.6.4 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) 16
2.6.5 การระเหย (Evaporation) 16
2.6.6 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) 16
2.6.7 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery) 17
2.6.8 การดูดซับ (Adsorption) 17
2.7 ทฤษฎีการดูดซับ 18
2.7.1 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล 19
2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ 20
2.7.3 สมดุลของการดูดซับ 22
2.7.4 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์ม 23
2.8 แลกเคส 25
2.8.1 แหล่งกำเนิดของแลกเคส 25
2.8.2 การเร่งปฏิกิริยาของแลกเคส 26
2.8.3 การนำไปใช้งานของแลกเคส 26
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับสภาพเส้นใยลิกโนเซลลูโลสด้วยแลกเคส 28
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยลิกโนเซลลูโลส 29
3. วิธีการทดลอง 30
3.1 วัสดุและสารเคมี 30
3.1.1 วัสดุ 30

บทที่ หน้า

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ 30
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไผ่ 30
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 31
3.3 การดำเนินการวิจัย 32
3.3.1 การเตรียมเส้นใยไผ่ก่อนนำไปปรับสภาพ 33
3.3.2 การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไผ่ 33
3.3.2.1 การเตรียมโซเดียมแอซิตเทตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.2 โมล 33
3.3.2.2 การเตรียมสารละลายแลกเคส 33
3.3.2.3 การเตรียมรีซอร์ซินอลความเข้มข้น 0.3 โมล 33
3.3.3 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคส 33
3.3.3.1 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 33
3.3.3.2 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณรีซอร์ซินอล 34
3.3.3.3 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณแลกเคส 34
3.3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ 36
3.4 การตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออออนในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ 36
3.4.1 การดูดซับโลหะหนักของเส้นใยไผ่ 36
3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะไอออนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ 37
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเศษเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ 38
3.5.1 การวัดค่าความชื้น 38

บทที่	หน้า
3.5.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของรูพรุน (pore diameter) ด้วยเครื่อง BET Surface Analyzer	38
3.5.3 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)	40
3.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR)	41
3.6 การศึกษาผลของระยะเวลาต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์	41
3.7 การวิเคราะห์ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ	42
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล	44
4.1 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักไอออนชนิดต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ	44
4.1.1 เส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	44
4.1.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยไผ่	45
4.1.3 ผลของปริมาณแลกเคสในการปรับสภาพเส้นใยไผ่	48
4.1.4 ผลของปริมาณรีซอร์ซินอลในการปรับสภาพเส้นใยไผ่	49
4.2 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเศษเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ	52
4.2.1 โครงสร้างทางเคมี	52
4.2.2 ความชื้นของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ	54
4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ	54
4.2.4 พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของรูพรุน (average pore diameter)	56
4.3 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก	57
4.4 ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ	58

บทที่ หน้า

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักไอออนที่มีต่อการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ 58

4.4.2 ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ 59

5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 64

5.1 สรุปผลการทดลอง 64

5.2 ข้อเสนอแนะ 65

รายการอ้างอิง 66

ภาคผนวก 69

ภาคผนวก ก 70

ภาคผนวก ข 80

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 83

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	การใช้งานไผ่ในด้านต่างๆ	9
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของตะกั่ว	11
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติของทองแดง	12
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติของสังกะสี	13
ตารางที่ 3.1	แหล่งที่มาและคุณภาพของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	30
ตารางที่ 3.2	แหล่งที่มาและคุณภาพของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย	30
ตารางที่ 3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	31
ตารางที่ 3.4	ปริมาณการเติมสารละลายแลกเคสในการปรับสภาพเส้นใยไผ่โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณแลกเคส	34
ตารางที่ 4.1	ความชื้นของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ	54
ตารางที่ 4.2	พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ	56
ตารางที่ 4.3	ผลของการทดลองหาไอโซเทิร์มของเส้นใยไผ่	63

สารบัญภาพ

รูปประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	4
รูปที่ 2.2	น้ำตาลโมโนเมอร์ในเฮมิเซลลูโลส	5
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของโมโนลิกนอล	6
รูปที่ 2.4	ลำต้นและใบของไผ่	6
รูปที่ 2.5	รากของไผ่	6
รูปที่ 2.6	ก) กลุ่มท่อน้ำเลี้ยงของไผ่ ขยาย 20 เท่า ข) ท่อน้ำเลี้ยงขยาย 40 เท่า และเส้นใยขยาย 20 เท่า ค) ผนังเซลล์และเซลล์ของท่อน้ำเลี้ยงขยาย 40 เท่า	7
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของ polylamellate ของเส้นใยไผ่	8
รูปที่ 2.8	ก) การดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ข) การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)	18
รูปที่ 2.9	ขั้นตอนในการดูดซับ	20
รูปที่ 2.10	ไอโซเทิร์มประเภทต่างๆ	22
รูปที่ 2.11	ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์	24
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิก	25
รูปที่ 3.1	แผนภาพขั้นตอนการทดลอง	32
รูปที่ 3.2	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS)	37
รูปที่ 3.3	เครื่องชั่งน้ำหนักอินฟราเรด	38
รูปที่ 3.4	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area Analyzer)	39
รูปที่ 3.5	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400	40
รูปที่ 3.6	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) รุ่น Nicolet6700	41
รูปที่ 4.1	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	44
รูปที่ 4.2	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ	46
รูปที่ 4.3	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิห้อง(29 องศาเซลเซียส)ที่ระยะเวลาต่างๆ	46

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ 47
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ 47
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ 48
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่ปริมาณต่างๆ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 ชั่วโมง 49
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยรีซอร์ซินอลที่ปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 ชั่วโมง 50
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพด้วยแลกเคสที่ภาวะต่างๆ 51
รูปที่ 4.10 FTIR Spectra ของเส้นใยไผ่ 53
รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ 55
รูปที่ 4.12 แสดงน้ำหนักของโลหะหนักไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยไผ่ B_x ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ 57
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยไผ่ Bx ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ 58
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะหนักทองแดงของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดลิก 60
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดลิก 61
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะหนักสังกะสีของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดลิก 62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในภาวะปัจจุบันที่หลายฝ่ายทั่วโลกตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมประกอบกับปริมาณการใช้งานโลหะหนักในกิจกรรมต่างๆ ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสียส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยโลหะหนักสามารถเกิดการรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโลหะหนักรวมตัวกับสารอินทรีย์สามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ดังนั้นเมื่อมีโลหะเหล่านี้แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร โลหะหนักจึงสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้โดยจะส่งผลกระทบต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจทำให้เกิดความพิการและเสียชีวิตได้ (เกศสุชา, 2537)

โลหะหนักชนิดต่างๆ ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และชุบโลหะ เป็นต้น ทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสียเป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้จำเป็นจะต้องทำการบำบัดให้อยู่ระดับมาตรฐานที่ปลอดภัยก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป การกำจัดน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่นี้มีอยู่หลายวิธีเช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การใช้สารเคมีทำให้เกิดการตกตะกอน (chemical precipitation) การแยกด้วยไฟฟ้า (electrolysis) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (membrane process) การบำบัดทางชีวภาพ (biological process) และการดูดซับ (adsorption) (Sawyer et al., 2003) อย่างไรก็ตามกระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการดูดซับมีความนิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายต่อการออกแบบกระบวนการบำบัด อีกทั้งตัวดูดซับหลายชนิดยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยปราศจากสีและกลิ่น ซึ่งการดูดซับบางชนิดอาจเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ (O' Connell, 2008)

กระบวนการดูดซับโลหะหนักนั้นมีพฤติกรรมการดูดซับที่สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมี การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน และการดูดซับแบบไอโซเทิร์ม สำหรับตัวดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มที่ได้จากพืชประเภทรูพรุนและกลุ่มแร่ธรรมชาติ ตัวดูดซับที่ได้รับความนิยมมากที่สุดชนิดหนึ่งคือ ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนัก อย่างไรก็ตามยังมีราคาแพง จึงนิยมใช้ดูดซับสารอินทรีย์มากกว่าดูดซับไอออนของโลหะหนัก

เส้นใยลิกโนเซลลูโลสซึ่งเป็นตัวดูดซับกลุ่มที่ได้จากพืชประเภทรูพรุนได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้ในการบำบัดโลหะหนัก ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณมาก ราคาถูก หาได้ง่ายในแต่ละท้องถิ่นและสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยทั่วไปในการปรับสภาพเส้นใยลิกโนเซลลูโลสมักมีการใช้สารเคมี แต่เพื่อเป็นการตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม เอนไซม์ซึ่งเป็นสารทางชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติจึงมีบทบาทสำคัญในการนำมาปรับสภาพเส้นใยลิกโนเซลลูโลสมากขึ้น ตัวอย่างเช่นแลกเคสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ได้จากเชื้อราขาวในตระกูลบาซิโอไมไซด์จะไปเร่งปฏิกิริยาให้สารตัวกลาง (mediator) เช่นฟีนอล หรือรีซอร์ซินอล เกิดอนุมูลอิสระ จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นก็จะไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับลิกนินได้หมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งสามารถจับกับประจุบวกของโลหะหนักได้มากขึ้น (Kenealy, 2003) (Widsten, 2008) ดังนั้นเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยแลกเคสจึงน่าจะมีสมบัติเหมาะสมในการเป็นตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียได้ดี

จากตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการนำเส้นใยธรรมชาติที่เป็นลิกโนเซลลูโลสมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยแลกเคสเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพและราคาถูกเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดในการนำเศษเส้นใยไผ่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรหรือจากอุตสาหกรรมเครื่องเรือนและหัตถกรรม มีส่วนประกอบของเซลลูโลสและลิกนินอยู่สูงประมาณร้อยละ 26-43 และ 21-31 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปตามพื้นผิวสามารถดูดซับโลหะไว้ที่พื้นผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นชั้นได้ มาปรับสภาพพื้นผิวด้วยแลกเคสเพื่อดูดซับโลหะตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีในสารละลาย จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา พื้นที่ผิว และขนาดของรูพรุนของเศษเส้นใยไผ่ ศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ และเวลาที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของเศษเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพพื้นผิว หาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพพื้นผิว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวของเศษเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสเพื่อดูดซับโลหะหนักไอออน
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเศษเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพพื้นผิว
3. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักไอออนด้วยเศษเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพพื้นผิว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ปรับสภาพเศษเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสที่ภาวะต่างๆ และศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี เพื่อคัดเลือกภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยไผ่ที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักไอออนชนิดต่างๆ
2. ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไผ่ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ
3. ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดต่างๆ
4. วิเคราะห์หาไอโซเทิร์มในการดูดซับโลหะหนักไอออนของเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสม โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักไอออนชนิดต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มมูลค่าของเศษเส้นใยไผ่ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักไอออนในน้ำเสียได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ (natural fibers) คือ เส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ เส้นใยที่ได้จากแร่ธาตุ (mineral fibers) เส้นใยที่ได้จากสัตว์ (animal fibers) และเส้นใยที่มาจากพืช (vegetable fibers) ซึ่งเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้จะมีปริมาณมากในธรรมชาติและก็เกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อยๆ อีกทั้งยังมีราคาถูก หากเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้งานในด้านต่างๆ อาทิ เช่น ใช้เป็นวัสดุสิ่งทอ วัสดุวิศวกรรม สารเติมแต่งในพลาสติกเป็นต้น เส้นใยที่ได้มาจากพืชที่ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีปริมาณมากและหาง่ายในธรรมชาติ อีกทั้งยังมีราคาถูก ได้แก่ ฝ้าย ป่าน ปอ สับปะรด มะพร้าว นุ่น ศรนารายณ์ ลินิน และไผ่ เป็นต้น

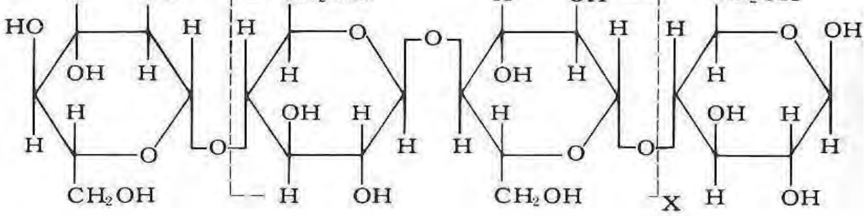
เส้นใยไผ่นับเป็นเส้นใยลิกโนเซลลูโลสที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมไม้ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพอลิเมอร์และยาง เป็นต้น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงองค์ประกอบ และคุณสมบัติของเส้นใยไผ่เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน

2.2 เส้นใยลิกโนเซลลูโลส

เส้นใยลิกโนเซลลูโลส คือ ส่วนประกอบของพอลิเมอร์ธรรมชาติ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ประกอบขึ้นเป็นลิกโนเซลลูโลส

2.2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส คือ สายโซ่ตรงของพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยซ้ำของ D-glucose โดยเชื่อมกันด้วย ß-1, 4-glucosidic ที่ตำแหน่ง C1 และ C4 แสดงดังรูปที่ 2.1

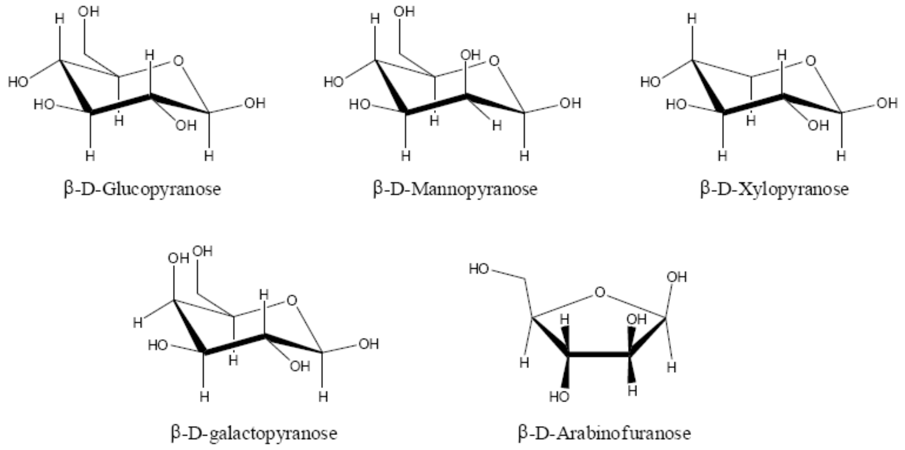


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Lyle, 1982)

เนื่องจากมีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากในสายโซ่หลักของเซลลูโลส จึงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งในและระหว่างโมเลกุล ซึ่งพันธะไฮโดรเจนนี้ทำให้เกิดความแข็งแรงและนำไปสู่โครงสร้างผลึก เมื่อโมเลกุลของเซลลูโลสมารวมตัวกันจะเกิดเป็นไมโครไฟบิล ในบริเวณที่มีมากจะเกิดเป็นส่วนของผลึกและในบริเวณที่รวมตัวกันน้อยจะเกิดเป็นส่วนของสัณฐาน โดยไมโครไฟบิลก่อให้เกิดไฟบิลและกลายเป็นเส้นใยเซลลูโลส

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส คือ สายเฮกโทแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลที่แตกต่างกัน คือ กลูโคส ไซโลส แมนโนส กาแลคโทส และ อราบิโนส แสดงดังรูปที่ 2.2



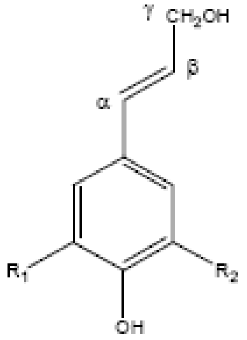
รูปที่ 2.2 น้ำตาลโมโนเมอร์ในเฮมิเซลลูโลส (Witayakarn, 2008)

เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานที่มีดัชนีการเกิดพอลิเมอร์ต่ำ (DP = 50-300) และมีโครงสร้างเป็นกิ่ง เฮมิเซลลูโลสมีความชอบน้ำสูง ละลายได้ในด่างและง่ายต่อการย่อยสลายด้วยกรด คุณสมบัติและส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลสเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดโดยปริมาณเฮมิโซลลูโลที่มีอยู่ในไม้เนื้ออ่อน คือประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 30 และในไม้เนื้อแข็ง คือประมาณร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 35

2.2.3 ลิกนิน

ลิกนิน เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับ 2 ของโลก โดยเป็นสารประกอบพอลิเมอร์อะโรมาติกเชิงซ้อนซึ่งพบมาในไม้และผนังเซลล์ของพืช ลิกนินในธรรมชาติทั้งหมดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานและมีความชอบน้ำซึ่งให้ความแข็งแรงแก่พืช โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ของลิกนินมีลักษณะเป็นการเชื่อมโยงพอลิเมอร์แบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบกันเป็นหน่วยของไฮดรอกซีฟีนิลโพรเพน

โครงสร้างของลิกนินในปัจจุบันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด อันเนื่องมาจากความยากลำบากในการแยกลิกนินโดยที่ไม่มีการปรับสภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลส่วนใหญ่จะได้มาจากผลิตภัณฑ์การย่อยสลายของลิกนินและนำมาทำการศึกษาแบบจำลอง จากหลักฐานแสดงว่าลิกนินมีจุดเริ่มต้นมาจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของโมโนลิกนอลที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ sinapyl, conifer และ p-coumary alcohol ในหน่วยของไฮดรอกซีฟินิลโพรเพน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3



Coniferyl alcohol (softwood/hardwood): $R_1 = OCH_3, R_2 = H$

p-Coumaryl alcohol (softwood/hardwood): $R_1 = R_2 = H$

Sinapyl alcohol (hardwood): $R_1 = R_2 = OCH_3$

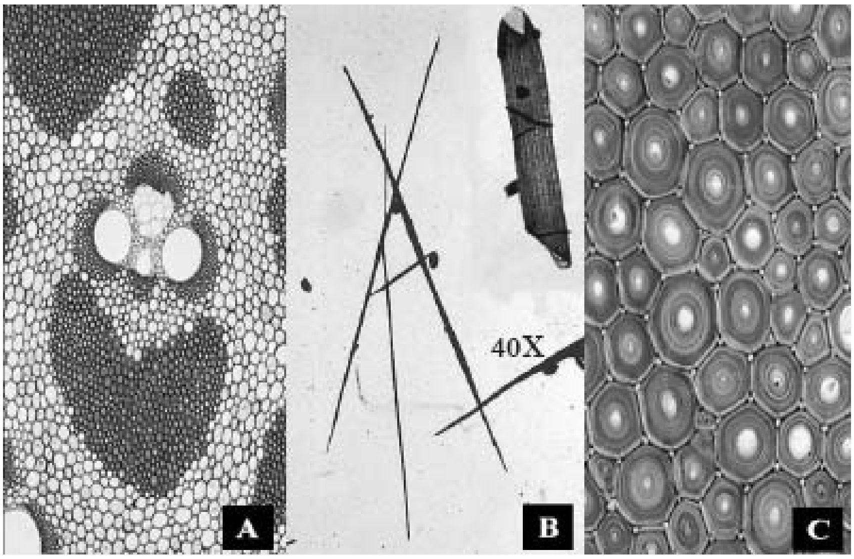
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโมโนลิกนอล (Sarkanen, 1971)

2.3 เส้นใยไผ่

ไผ่เป็นพืชที่อยู่ในตระกูล *Bambusaceae* ต้นไผ่ประกอบด้วยราก ลำต้น และใบ โดยส่วนของลำต้นนั้นสามารถใช้ในการจำแนกชนิดของไผ่ได้ ภายในลำต้นไผ่จะมีรูพรุน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สี และผิวสัมผัส ที่มีความแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาจากภาพตัดขวางในลำต้นของไผ่สามารถพบจุดเล็กๆสีดำ ปริมาณมากอยู่ภายในลำต้น

รูปที่ 2.4 ลำต้นและใบของไผ่

รูปที่ 2.5 รากของไผ่

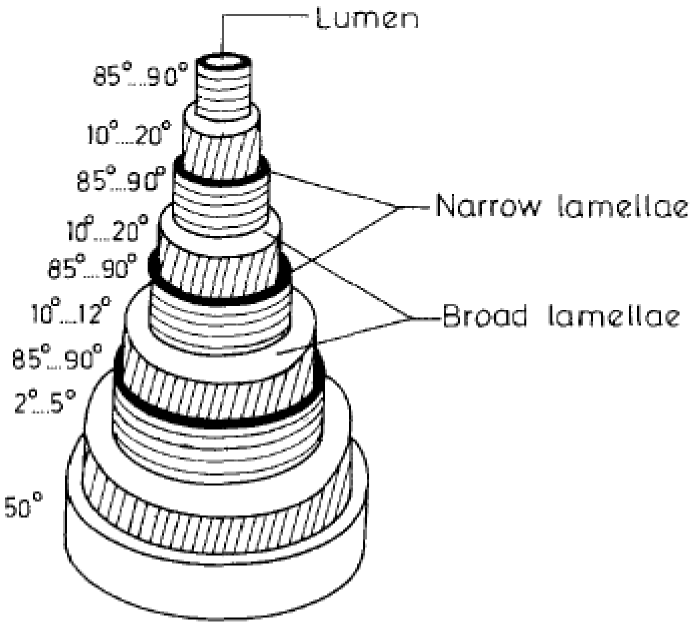


ก) ข) ค)

รูปที่ 2.6 ก) กลุ่มท่อน้ำเลี้ยงของไผ่ ขยาย 20 เท่า
ข) ท่อน้ำเลี้ยงขยาย 40 เท่า และเส้นใยขยาย 20 เท่า
ค) ผนังเซลล์และเซลล์ของท่อน้ำเลี้ยงขยาย 40 เท่า
(Kamthai, 2007)

ลำต้นของไผ่มีเส้นใยทั้งหมดร้อยละ 60-70 ซึ่งเกิดจากเนื้อเยื่อ sclerenchymatous เส้นใยไผ่มีความยาวเฉลี่ย 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 ถึง 20 ไมโครเมตร ความแข็งแรงของเส้นใยไผ่ขึ้นอยู่กับจำนวนมัดของเส้นใยและการกระจายตัวของเส้นใย โดยจะมีร้อยละของเส้นใยเพิ่มขึ้นจากด้านล่างถึงด้านบนของลำต้นไผ่

โครงสร้างหลักของเส้นใยไผ่ประกอบไปด้วยแผ่นบางๆ และชั้นที่มีขนาดแตกต่างกันซึ่งมีการเรียงตัวของ fibrillar ในทิศทางต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เรียกว่า โครงสร้างของ polylamellate โดยในชั้นที่มีความกว้างมากกว่า เส้นใยจะมีมุมของการเรียงตัวไปยังแกนของเส้นใยน้อย ในขณะที่ชั้นที่มีความกว้างน้อย เส้นใยจะวางเรียงตัวกันในแนวทแยงเป็นส่วนมาก และในชั้นที่แคบกว่าจะมีปริมาณของลิกนินสูงกว่าชั้นที่กว้างกว่า ความแข็งแรงต่อการดึงของเส้นใยไผ่เกิดจากโครงสร้างผนังของ polylamellate นี้ ซึ่งไม่พบในพืชชนิดอื่น (Jain and Kumaar, 1992)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ polylamellate ของเส้นใยไผ่

ไผ่เป็นพอลิเมอร์เชิงประกอบของลิกโนเซลลูโลส สำหรับส่วนประกอบอื่นๆ ที่มีปริมาณเล็กน้อย เช่น โปรตีน กลูโคส แป้ง ไขมัน แว๊กซ์ และเกลือของสารอนินทรีย์ ส่วนประกอบเหล่านี้จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิด ภาวะในการเจริญเติบโต อายุ และส่วนของความยาวลำต้น เนื้อเยื่อในลำต้นจะเจริญเติบโตเต็มที่เมื่อมีอายุครบ 1 ปี ซึ่งจะทำให้ลำต้นที่นิ่มและเปราะแตกง่ายมีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับส่วนประกอบของลิกนินจะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา โดยเมื่อลำต้นโตเต็มที่ส่วนประกอบทางเคมีต่างๆ เหล่านี้จะมีแนวโน้มคงที่

2.4 **ไผ่ในประเทศไทย**

ต้นไผ่นั้นปลูกง่าย โตเร็ว เนื้อไม้มีน้ำหนักเบา แต่มีความเหนียวและมีความทนทานสูง ไผ่ส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทราย เนื่องจากจะมีสารพวกซิลิกอนมาก ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการสร้างเปลือกลำต้นและใบไม้ไผ่ได้เป็นอย่างดี และดินเหล่านั้นควรมีลักษณะเป็นกรดเล็กน้อย (กองวิจัยสินค้าและการตลาด, 2536)

ไม้ไผ่ในประเทศไทยมีประมาณ 13 สกุล 60 ชนิด โดยแหล่งไม้ไผ่ในประเทศไทยประกอบด้วยไม้ไผ่ในป่าธรรมชาติและไม้ไผ่ในป่าปลูก

- ไม้ไผ่จากป่าธรรมชาติ พบมากที่จังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี สุพรรณบุรี และตาก รองลงมาได้แก่ แม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ ลำปาง เลย นครนายก สระบุรี ปราจีนบุรี และจันทบุรี

- ไม้ไผ่ในป่าปลูก ส่วนใหญ่ปลูกไผ่ตงที่จังหวัดปราจีนบุรี สำหรับไผ่รวกและไผ่เลี้ยงจะมีปลูกมากที่จังหวัดกำแพงเพชร ลำปางและเชียงราย

ประโยชน์ของไม้ไผ่

ไม้ไผ่เป็นทรัพยากรป่าไม้ที่มีคุณค่ามาก เนื่องจากประโยชน์ในการใช้สอยดังตารางที่ 2.1 ซึ่งมีผลต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศในด้านการใช้ผลิตภัณฑ์ภายในประเทศลดการนำเข้า นำเงินตราเข้าประเทศจากการส่งออกทั้งในรูปของไม้ไผ่และผลิตภัณฑ์ และยังก่อให้เกิดการจ้างงานภายในประเทศ

ตารางที่ 2.1 การใช้งานไผ่ในด้านต่างๆ (Xiaobo,1999)

การใช้งานไผ่ในด้านพืชพรรณ	การใช้งานไผ่ในด้านวัสดุ
ไม้ประดับในสวน	**อุตสาหกรรมท้องถิ่น**
	เครื่องจักสาน
	เฟอร์นิเจอร์
	เครื่องใช้ต่างๆ
	ปลูกบ้าน
ด้านนิเวศวิทยา	**อุตสาหกรรมไม้และกระดาษ**
รักษาเสถียรภาพของดินและบังลม	แผ่นกระดาน
	กระดานอัด
	ไม้อัดกาว
	กระดาษและเส้นใย
	ไม้ปาร์เก้
ด้านการเกษตร	**อุตสาหกรรมอาหาร**
ปลูกเป็นพืชไร่	หน่อไม้สำหรับบริโภค
ปลูกเป็นพืชสวนผสม	อาหารสัตว์
	อุตสาหกรรมเคมี
	ผลิตภัณฑ์ชีวเคมี
	อุตสาหกรรมยา
	ด้านพลังงาน
	ผลิตภัณฑ์ถ่าน
	เชื้อเพลิงในการเผาให้ความร้อน
	แก๊สชีวภาพ

ไม้ไผ่ที่สำคัญต่อเศรษฐกิจไทย

ไม้ไผ่ที่มีจำนวนมาก และมีการนำมาใช้ประโยชน์มากกว่าชนิดอื่นๆ ได้แก่

1. ไผ่ตง ใช้หน่อบริโภคภายในประเทศและส่งออก ลำต้นมีขนาดใหญ่ ข้อและปล้องหนา เหมาะสำหรับทำเสาโป๊ะ หรือนำไปแปรรูปเป็นตะเกียบ ไม้จิ้มฟัน
2. ไผ่รวก เป็นไผ่ที่ปลูกกันแพร่หลายรองจากไผ่ตรง ใช้ได้ทั้งเป็นลำ นำไปใช้จักสาน ส่วนหน่อนิยมรับประทาน
3. ไผ่เลี้ยง เป็นไผ่ที่นิยมปลูกกันแพร่หลายในลำดับต่อมา ประโยชน์ส่วนใหญ่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ หน่อนิยมรับประทาน
4. ไผ่หนาม เป็นไผ่ที่ขึ้นตามธรรมชาติทั่วไป ใช้ประโยชน์ทั้งเป็นไม้ลำและไม้ผ่า หน่อนิยมรับประทาน
5. ไผ่นวล ส่วนใหญ่เป็นไผ่ที่ขึ้นในป่าธรรมชาติ ปัจจุบันมีการปลูกบ้างแล้ว แต่ยังไม่มากนัก เป็นไผ่ที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการจักสานมาก
6. ไผ่ไร่ เป็นไม้ที่ขึ้นในภาคเหนือและภาคตะวันตก ใช้ทำเครื่องเรือนได้ดี หน่อนิยมรับประทาน
7. ไผ่สีสุก นิยมใช้ทำกระบอกข้าวหลาม เนื่องจากมีเยื่อไม้บางๆ ติดอยู่กับข้าวเหนียวหลังจากเผาข้าวหลามได้ที่แล้ว และยังปอกผิวไม้ได้ง่ายเวลาจะข้าวหลามรับประทาน

2.5 โลหะหนัก (Heavy Metals)

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ จากธาตุต่างๆ เท่าที่ค้นพบ 105 ธาตุ สมบัติทางภายภาพของโลหะหนัก คือ มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลว) สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมัน วาวเหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี สมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า จึงสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex-compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) (ประกฤต, 2539) ซึ่งจะสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (เกศสุชา, 2537)

2.5.1 ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุหมู่ 4A ทุกธาตุในหมู่นี้มีเวเลนส์อิเล็กตรอน 4 ตัว ตะกั่วมีสมบัติที่สำคัญบางประการ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของตะกั่ว (Jack, 1990)

สมบัติ	ค่า
Atomic Number	82
Atomic Weight	207.2
Density (g/cm^3)	11.342
Melting Point (°C)	327
Boiling Point (°C)	1751
mean specific heat capacity at 100°C (Jkg^{-1}K^{-1})	129.8
thermal conductivity (at ambient temp) (Wm^{-1}K^{-1})	34.9
coefficient of thermal expansion 0-100°C (10^{-6}).K^{-1}	29.0
electrical resistivity at 20°C, (μ ohm cm)	20.6

<u>ประโยชน์ของตะกั่ว</u>

1) ใช้ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีแดง (red lead) สีเหลืองส้ม (litharge) และสีขาว (lead carbonate) ตะกั่วขาวและแดงใช้ในการทำสี ตะกั่วสีส้มเป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมกระจก เครื่องเคลือบบางชนิด
2) ใช้ทำหม้อแบตเตอรี่และโลหะหุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าต่างๆ
3) สารเตตระเอทิลเลด (tetraethyllead $Pb(C_2H_5)_4$) ใช้เป็นตัวเติมในน้ำมันเบนซินพลังสูงเพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบขึ้น (Antiknock) นอกจากนี้เป็นการใช้ที่สูญไปเลยไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก เพราะเผาแล้วกลายเป็นไอ เป็นมลพิษ (pollution) ต่อสิ่งแวดล้อม แต่ปัจจุบันได้มีการเลิกนำไปใช้ทั้งในประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลก
4) ใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมทำท่อน้ำต่างๆ ตลอดจนทำพีวีซี
5) ใช้ในการผลิตกระสุนปืนชนิดต่างๆ
6) ใช้ในอุตสาหกรรมโลหะผสมต่างๆ เช่น ตะกั่วผสมดีบุก เป็นโลหะบัดกรี (solder) และใช้ตะกั่วในระบบสัญญาณไฟไหม้อัตโนมัติซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 70 องศาเซลเซียส

<u>พิษของตะกั่ว</u>

อาการของพิษเมื่อได้รับตะกั่วอินทรีย์ ปวดศีรษะ ตัวสั่น โลหิตมีสีเข้ม อาเจียน มีอาการประสาทหลอนและแนวโน้มในการฆ่าตัวตายสูง นอกจากนี้ตะกั่วยังส่งผลต่อระบบการสังเคราะห์เม็ดเลือดแดง และทำลายหน่วยย่อยต่างๆของไต ซึ่งจะส่งผลให้การทำงานของไตผิดปกติ (ประกฤต, 2537) (Bradl, 2005)

2.5.2 ทองแดง

ทองแดงเป็นธาตุแรกของหมู่ IB โดยมีเลขอะตอม 29 จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน ทองแดงเป็นโลหะที่สกัดจากแร่ซึ่งมีส่วนผสมของทองแดงซัลไฟด์ที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่ง เพราะสามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี ไม่เป็นสนิม มีความเหนียวดี ขึ้นรูปง่าย มีสีสวยและสามารถผสมกับธาตุอื่นได้ดี สมบัติที่สำคัญบางประการของทองแดงแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของทองแดง

สมบัติ	ค่า
Atomic Number	29
Atomic Weight	63.55
Density (g/cm^3)	8.96
Melting Point (°C)	1083
Boiling Point (°C)	2560
mean specific heat capacity at 100°C (Jkg^{-1}K^{-1})	386
thermal conductivity (at ambient temp) (Wm^{-1}K^{-1})	397
coefficient of thermal expansion 0-100°C (10^{-6}).K^{-1}	17.0
electrical resistivity at 20°C, (μ ohm cm)	16.9

<u>ประโยชน์ของทองแดง</u>

1) ใช้ทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือต่างๆ
2) ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง
3) ใช้ในผลิตหม้อต้มน้ำ กาน้ำ ถังน้ำ ท่อน้ำ และขดลวดกาต้มน้ำร้อน ฯลฯ
4) ใช้เคลือบผิวของโลหะ

5) ใช้ทำโลหะเจือ เช่น ทองเหลือง (brass) คือ โลหะเจือของทองแดง (70%) และสังกะสี (30%)
6) อื่นๆ เช่น ในร่างกายมนุษย์ทองแดงช่วยในกระบวนการเผาผลาญอาหาร (metabolism) ของร่างกาย การสร้างเม็ดเลือดแดงและการสังเคราะห์เอนไซม์บางชนิด และใช้ในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์และเอนไซม์ของพืช

<u>พิษของทองแดง</u>

ความเป็นพิษเฉียบพลันอันเนื่องมาจากทองแดงพบได้น้อยมากในมนุษย์ แต่มักจะมีผลในระยะยาว ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการได้รับทองแดงในปริมาณเล็กน้อยไม่เพียงแต่ไม่เป็นพิษ ยังเป็นสิ่งที่ร่ายการเราต้องการ แต่ถ้ามีในปริมาณสูงก็จะให้โทษและเป็นพิษได้ เช่น $CuSO_4$ 27 กรัมทำให้ตายได้ ถ้ารับประทานปริมาณน้อยกว่านี้จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชาและสำลัก

2.5.3 สังกะสี

สังกะสีมีเลขอะตอม 30 เป็นธาตุแรกของหมู่ IIB จัดเป็นโลหะ โดยสมบัติที่สำคัญบางประการแสดงในตารางที่ 2.4 เนื่องจากสังกะสีมีเลขออกซิเดชันได้เพียงค่าเดียวคือ +2 และขาดสมบัติทั่วไปของธาตุ ทรานซิชัน ในปัจจุบันจึงไม่จัดสังกะสีเป็นโลหะทรานซิชัน แต่เรียกว่าเป็นธาตุหลังทรานซิชัน (post transition element)

ตารางที่ 2.4 สมบัติของสังกะสี

สมบัติ	ค่า
Atomic Number	30
Atomic Weight	65.38
Density (g/cm^3)	7.13
Melting Point (°C)	420
Boiling Point (°C)	911
mean specific heat capacity at 100°C ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	394
thermal conductivity (at ambient temp) ($Wm^{-1}K^{-1}$)	119.5
coefficient of thermal expansion 0-100°C (10^{-6}).K^{-1}	31
electrical resistivity at 20°C, (μ ohm cm)	5.96

<u>ประโยชน์ของสังกะสี</u>

1) ใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะเจือ เช่น ทองแดง และอะลูมิเนียมในการผลิตแผ่นโลหะเจือ
2) ใช้เคลือบผิว (galvanizing) เหล็กกล้าเพื่อป้องกันการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า
3) ใช้เติมในยางและสี
4) อื่นๆ เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ ฟิวส์ไฟฟ้า แอโนดของเซลล์ไฟฟ้า ถ่านไฟฉาย (dry cell) การเตรียมสารเคมีของสังกะสี และนอกจากนี้สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของคนและสัตว์

<u>พิษของสังกะสี</u>

สังกะสีในรูปธาตุไม่ปรากฏเป็นพิษ และตามความเป็นจริงแล้ว การได้รับสังกะสีปริมาณมากจะทำให้มีผลกระทบต่อการเผาผลาญคลอเลสเตอร์รอลของร่างกาย แต่จัดอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถถูกขจัดออกจากร่างกายอย่างรวดเร็ว (สิริกุลกันยา, 2549), (Bradl, 2005)

2.6 **กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก** (ชัชฎาพร, 2545)

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในด้านต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.6.1 **การตกตะกอนผลึกทางเคมี** (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมกันมานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธี คือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (sulfide precipitation)

2.6.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาดังสมการนี้

$$M^{++}+2NaOH \text{ -----------------------> } M(OH)_2+2NA^{+}$$

โดย M^{++} คือ โลหะอิออน

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชกว้าง โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถจะละลายกลับมาได้อีกถ้าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

2.6.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ มักใช้สารเคมีในการตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอรัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

$$M^{++}+Na_2S \text{ -----------------------> } MS+2NA^{+}$$

โดย M^{++} คือ โลหะอิออน

ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซับไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) ซึ่งเกิดจากอิออนของซัลไฟด์มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการบำบัดเอาซัลไฟด์ออกไปก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.6.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (rasin) ที่มีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออน เอ็กเชนเจอร์ (cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอไอออน เอ็กเชนเจอร์ (anion exchanger) วิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับการ

กำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า วิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.6.3 **ออกซิเดชันและรีดักชัน** (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน (II) ซัลเฟต โซเดียมเบตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.6.4 **รีเวอร์สออสโมซิส** (Reverse osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตต และโพลีเอมีน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน semi-permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกไปก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

2.6.5 **การระเหย** (Evaporation)

วิธีการระเหยน้ำออกนี้เป็นวิธีง่ายๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักมากเท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.6.6 **อิเล็กโตรไดอะไลซิส** (Electrodialysis)

วิธีนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงควบคู่กับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกัน

การอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนการบำบัดสูงแต่มีข้อดี คือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.6.7 **การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า** (Electrolytic recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.6.8 **การดูดซับ** (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยใช้วัสดุตัวดูดซับในการดูดซับมลสารไว้ เนื่องจากตัวดูดซับมีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับน้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุน ทำให้น้ำทิ้งสะอาด สารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 A° ถึง 20,000 A° กระบวนการนี้สามารถนำกลับมาใช้กำจัดโลหะหนักใหม่ได้

หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้กระบวนการต่างๆ ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสม คือ

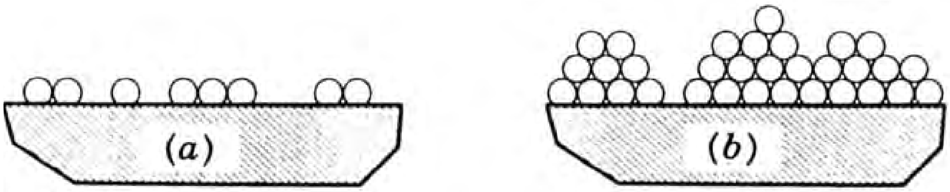
- ลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัด
- คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัดน้ำเสียทั้งหมด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และการตรวจสอบคุณภาพ
- ความยากง่ายและความปลอดภัยในการเดินระบบ
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียหรือกากของเสียที่ต้องกำจัดกลับมาใช้ใหม่

2.7 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับนั้นเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของของแข็ง หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) โดยกลไกการดูดซับเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ตัวดูดซับ

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากความแตกต่างของพลังงานและแรงดูดติดผิวทางไฟฟ้า (แรงวาลเดอร์วาล์ว) ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) แสดงดังรูปที่ 2.8 กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือ จำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 a) การดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
b) การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) (Richard, 1996)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูดซับที่ก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการ๖ดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) แสดงดังรูปที่ 2.8 ก) และไม่สามารถที่จะผันกับได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้ (reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นการทำให้เกิดการคายสารออกขึ้น การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้มีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1) กลุ่มที่ได้จากพืชประเภทรูพรุน

วัสดุกลุ่มนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กมากกระจุดกระจายอยู่ทั่วไป ตามพื้นที่ผิวของวัสดุ ตัวถูกดูดซับสามารถดูดซับไว้ที่ผิวของวัสดุในลักษณะเป็นชั้น (layer) ทำให้วัสดุกลุ่มนี้สามารถใช้ในการดูดซับได้ โดยความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ถ้าปริมาณคาร์บอนสูงจะดูดซับได้ดี เช่น แกลบเผา ถ่าน และถ่านกัมมันต์

2) กลุ่มแร่ธาตุจากธรรมชาติ

วัสดุกลุ่มนี้ภายในโครงสร้างจะประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอล เชื่อมต่อกันกับแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรอล การดูดซับไอออนของตัวดูดซับเกิดจากการที่มีการแตกหักของพันธะเคมีมีภายในโครงสร้าง ทำให้เกิดประจุตกค้างขึ้น โดยมีปะจุตกค้างเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถดึงดูดประจุบวกที่มีอยู่ในสภาพมีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ (hydrated) ไว้ที่ผิวของมันได้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เช่น ดินขาวหรือเกาลิน เบนโทไนต์ และซีโอไลต์ (สิริกุลกันยา, 2549)

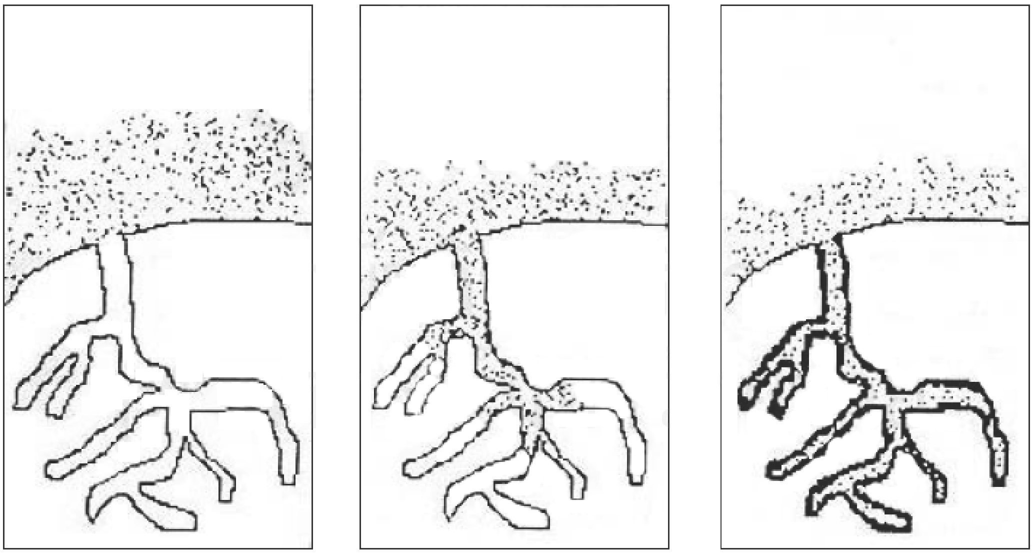
2.7.1 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมได้โดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขึ้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน คือ

1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับการขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในโมเลกุล (intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนในการดูดซับ (Noll et al., 1992 และ Faust et al., 1987)

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

อัตราเร็ว และขีดความสามารถ ในการดูดติดผิวของคาร์บอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบคาร์บอนจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาคาร์บอน ทำให้ film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำ เข้าไปหาคาร์บอนได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอน คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางลบ กล่าวคือ อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของคาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์ โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิว (adsorptive capacity) นั่นคือ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของคาร์บอนได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดของคาร์บอนจึงมี

บทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว คาร์บอนทั้งแบบผงและแบบเกร็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งมีหมายถึงการมีความสามารถในการดูดผิวใกล้เคียงกันด้วย (แต่อัตราไม่เท่ากัน)

3) **ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของคาร์บอน**

เมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำ(หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย มักสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวและความสามารถในการละลายน้ำ

4) **ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของคาร์บอน**

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของคาร์บอน จากการวิจัยพบว่าการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย(พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและคาร์บอนจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง

5) **พีเอช**

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี

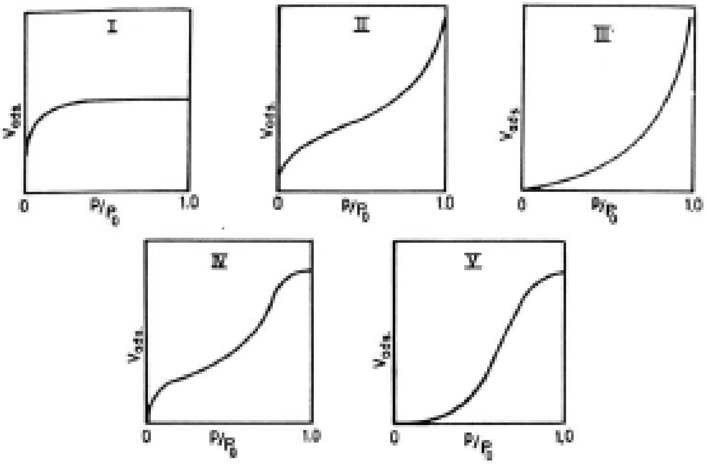
6) **อุณหภูมิ**

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ exothermic ระบบคาร์บอนดูดซับมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบต่างๆ โดยลดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 50-80 และสารแขวนลอย ร้อยละ 50-80 (เบญจวรรณ, 2547)

2.7.3 **สมดุลของการดูดซับ** (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับจากสารละลาย มีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็งในขณะที่เกิดการดูดซับขั้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายเมื่ออัตราการคายสารออก เข้าสู่ภาวะคงที่ (equilibrium state) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว สมดุลนี้จึงเป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และอื่นๆ ในการหาปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุล โดยปกติจะทดลองโดยการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายแทนการเพิ่มปริมาณของสารดูดซับ การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิวซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

รูปร่างของไอโซเทิร์มของการดูดซับจะให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทิร์มของการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจากไอโซเทิร์ม type I เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.10 ไอโซเทิร์มประเภทต่างๆ (Noll et al., 1992 และ Faust et al., 1987)

2.7.4 **สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์ม**

สมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทิร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมนำมาทำการศึกษาคือ สมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิก

1) **ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์** (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงเมียร์ ที่เรียกว่า Ideal localized monolayer model คือ

1. โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดติดผิวได้เพียงชั้นเดียว
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย โดยสารดูดติดผิวของไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ 2.1

$$q_e = (X_m b C_e)/(1+bC_e) \tag{2.1}$$

โดยที่

q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ต่อหน่วยน้ำหนักของของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

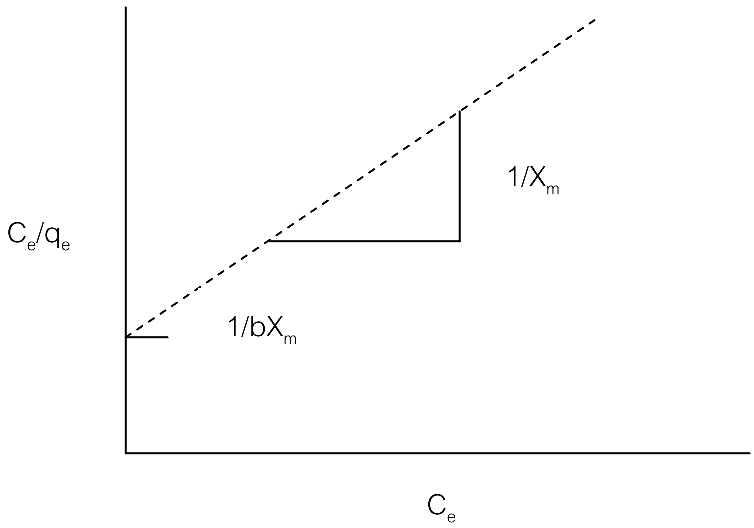
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

b = ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์

จากสมการที่ 2.1 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงตามสมการดังนี้

$$C_e/q_e = (1/bX_m)+(C_e/X_m) \tag{2.2}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/X_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/bX_m$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

2) **ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิก** (Freundlich adsorption isotherm)

ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิกใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_e = KC_c^{1/n} \qquad (2.3)$$

โดยที่

q_e = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

K = สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย

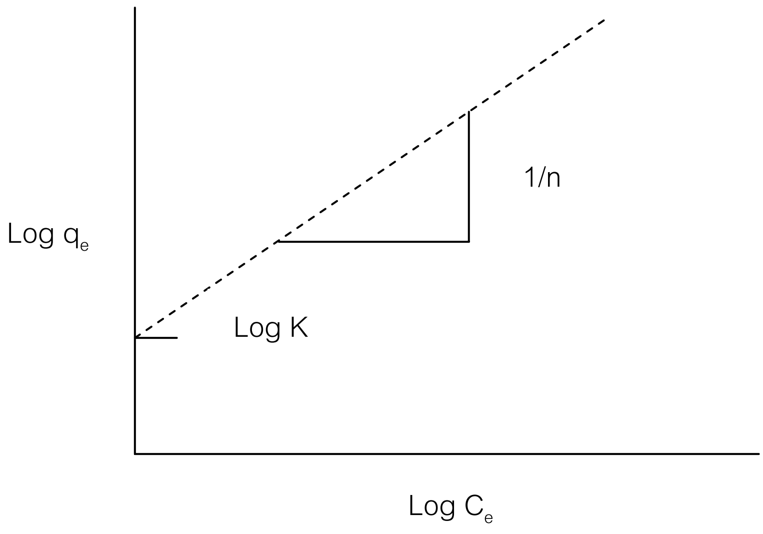
C_c= ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

n = ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการฟรุนดลิก

เนื่องจากสมการฟรุนดลิกเป็นฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล (exponential) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K + (1/n) \log C_e \qquad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q_e กับ log C_c จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ 1/n และมีจุดตัดแกนเท่ากับ log K เมื่อ log C_c = 0 (C_c=1) ค่า 1/n ที่ได้จากการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า 1/n ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิก

2.8 แลกเคส

แลกเคส (EC 1.10.3.2, p-diphenol oxidase) เป็นเอนไซม์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาทำการศึกษาตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 โดยในช่วงแรก Yoshida ได้อธิบายถึงแลกเคสไว้ในปี 1883 ว่าเป็นเอนไซม์ที่สกัดมาจากของเหลวที่ซึมออกมาจากต้นไม้ของญี่ปุ่น (*Rhus Vernicifera*) ที่ให้น้ำยางนำมาใช้งานเป็นแลกเกอร์ ต่อมาในปี 1896 Bertrand และ Labarde พิสูจน์ได้ว่า แลกเคสเป็นเอนเซม์ที่ได้จากเห็ดราเป็นครั้งแรก

แลกเคสเป็นโปรตีนขนาดใหญ่ที่มีทองแดงสีน้ำเงินเป็นองค์ประกอบ หรือเรียกอีกอย่างว่า "เอนไซม์สีน้ำเงิน" ซึ่งเอนไซม์อื่นๆ ที่อยู่ในกลุ่มนี้คือ ascorbate oxidases และ mammalian plasma protein ceruloplasma แลกเคสเป็นได้ทั้งเอนไซม์ที่มี โมโนเมริค หรือ มัลติเมริค ของทองแดงเป็นองค์ประกอบในการกระตุ้นปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจนกับสารตั้งต้นฟีโนลิกโดยใช้อิเล็กตรอนหนึ่งตัว โมเลกุลของออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายและทำให้เกิดการหายไปของน้ำ 2 โมเลกุล (Marielle, 2001)

2.8.1 แหล่งกำเนิดของแลกเคส

แลกเคสสามารถพบได้ทั่วไปทั้งในพืชและเห็ดรา โดยจะพบอยู่ในส่วนของโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบ ตัวอย่างในพืชเช่น แอบเปิ้ล มันฝรั่ง กะหล่ำปลี และหัวผักกาด เป็นต้น แลกเคสนิยมแยกสกัดมาจากเห็ดราสามชนิด คือ *Ascomyceteous, Deuteromyceteous* และ *Basidiomyceteous* เป็นส่วนมาก สำหรับเห็ดราชนิด *Ascomyceteou*s และ *Deuteromyceteous* นั้นส่วนใหญ่ไม่นิยมนำมาใช้งานในด้านการย่อยสลายลิกนิน ดังนั้นจึงใช้เห็ด

ราชนิด *Basidiomyceteous* มาใช้ในการย่อยสลายลิกนินมากกว่า เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินและมีการนำมาทำการศึกษาอย่างแพร่หลาย โดยอัตราการย่อยสลายของลิกนินจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของไม้และเป็นไปตามสภาวะแวดล้อมและชนิดเห็ดราที่ใช้

2.8.2 การเร่งปฏิกิริยาของแลกเคส

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแลกเคส เกิดจากการใช้ปฏิกิริยาอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ อิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารตั้งต้นรวมตัวกับอิเล็กตรอนสี่ตัวของปฏิกิริยารีดักชันออกซิเจน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่เสถียรและอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเอนไซม์อีกครั้งหรืออีกกรณีหนึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ ปฏิกิริยาดิสพรอบโพรชันเนชัน หรือปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Witayakarn, 2008)

2.8.3 การนำไปใช้งานของแลกเคส

<u>การฟอกขาวทางชีวภาพ (biobleaching)</u>

เนื่องจากผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการค้นคว้าวิจัยเพื่อกำจัดคลอรีนออกจากกระบวนการผลิตกระดาษ ดังนั้นการฟอกขาวทางชีวภาพจึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งาน เช่น การคัดเลือกเอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกนิน ที่สกัดมาจากเชื้อรา เช่น แลกเคส นำมาใช้ในการฟอกขาวแทนสารคลอรีนที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิตกระดาษ เป็นต้น เอนไซม์มีผลต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มความสว่างของกระดาษอย่างเห็นได้ชัด การใช้งานแลกเคสร่วมกับเมดิเอเตอร์นั้นเป็นที่นิยมอย่างมาก ตั้งแต่มีการค้นพบว่า แลกเคสนั้นสามารถออกซิไดซ์ส่วนประกอบของลิกนินที่ไม่อยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีโนลิกได้

แลกเคสที่ใช้ในกระบวนการฟอกขาวทางชีวภาพของอุตสาหกรรมกระดาษจะผลิตขึ้นมาจากเชื้อรา *T. versicolor* ข้อดีในการใช้แลกเคสในการฟอกขาวคือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นและใช้ปริมาณของออกซิเจนในการขับเคลื่อนปฏิกิริยาออกซิเดชันจำนวนน้อย (Marièlle, 2001)

<u>การลดความเป็นพิษและขจัดสีของน้ำเสีย (detoxification and decolourisation of waste water)</u>

การกำจัดสารเคมีในกลุ่มของสารประกอบฟีโนลิคที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ตั้งแต่มีการค้นพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบเหล่านี้มีความเป็นพิษและหากเกิดการปนเปื้อนในน้ำดื่มน้ำใช้จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ การปนเปื้อนสารเคมีในกลุ่มฟีโนลิคนี้เกิดได้หลายทาง เช่น ทางการเกษตรโดย

การใช้งานยาปราบแมลงศัตรูพืช ปุ๋ยเคมี ของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ โรงงานผลิตปิโตรเคมี และการฟอกย้อมสีที่เกิดจากโรงงานสิ่งทอต่างๆ

ปัญหาที่พบในการใช้งานเอนไซม์เพื่อกำจัดความเป็นพิษของน้ำเสีย คือ ความไวต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของเอนไซม์ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และกระบวนการย่อยสลายโปรตีน (proteolysis) ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ เอนไซม์แลกเคสนับว่ามีข้อดีกว่าเอนไซม์ชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการย่อยสลายลิกนิน คือ การทำงานของแลกเคสไม่จำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำให้เกิดลิกนินเปอร์ออกซิเดสและทำปฏิกิริยาได้มากกว่าเอนไซม์ไทโรซิเนส

การย้อมสีที่ใช้ไตรฟีนิลมีเทนนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสารชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ย่อยสลายได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงมักพบว่ามีการปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมอยู่เป็นจำนวนมาก แลกเคสที่ได้จากกลุ่มเชื้อราขาวนั้นเป็นเพียงกลุ่มเดียวที่สามารถขจัดสีของน้ำเสียที่เกิดจากการย้อมสีชนิดนี้ได้ (Mariëlle, 2001)

<u>การประยุกต์ใช้งานแลกเคสความเข้มข้นสูงในการปรับสภาพเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษควบคู่กับการใช้กรดแกลลิค (gallic acid)</u>

เอนไซม์แลกเคสสามารถทำปฏิกิริยากับกรดแกลลิค โดยผลที่ได้จากการทดลองสามารถปรับสภาพกระดาษให้มีความทนทานต่อการพองเพิ่มขึ้นร้อยละสามสิบสี่ ทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละยี่สิบ และทนทานต่อแรงดึงในขณะที่เปียกเพิ่มขึ้นร้อยละเจ็ดสิบสอง เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ ซึ่งความแข็งแรงของกระดาษมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็นผลมากจากการเพิ่มขึ้นของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยและการเกิดประจุของกลุ่มฟีนอกซีที่เกิดการเชื่อมขวาง (cross-link) กันภายในแผ่นกระดาษ

<u>การใช้งานแลกเคสในกระบวนการฟอกทำความสะอาดเส้นใยป่าน</u>

กระบวนการก่อนที่จะทำให้เส้นใยป่านกลายมาเป็นเส้นด้ายนั้น เส้นใยป่านจะต้องผ่านกระบวนการฟอกทำความสะอาดเส้นใยก่อน จากการค้นคว้าเพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีในการฟอกทำความสะอาดเส้นใยนั้น ทำให้ Ossola และ Galante พบว่าเอนไซม์สามารถใช้ทำงานได้ดีภายใต้สภาวะที่มีความเป็นด่างอ่อนๆ และยังพบอีกว่าการใช้งานแลกเคสร่วมกับเมดิเอเตอร์ในการฟอกทำความสะอาดเส้นใยนั้น จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารเคมี และเช่นเดียวกันผลการวิจัยของ Sharma และคณะได้ชี้ให้เห็นว่าเอนไซม์แลกเคสมีส่วนช่วยในการทำ

ความสะอาดและปรับสภาพเส้นใยป่าน โดยมีผลทำให้เกิดการเรียงตัวของเส้นใยที่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น

ข้อดีของการใช้แลกเคสในกระบวนนี้ คือ เอนไซม์จะเกิดปฏิกิริยาโดยไม่ทำให้เส้นใยเสียสภาพและเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

<u>การใช้งานแลกเคสเพื่อป้องกันการหดตัวของเส้นใยขนสัตว์</u>

โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้ในการป้องกันการหดตัวของเส้นใยขนสัตว์ คือ กระบวนการคลอริเนชัน (chlorination) ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการย่อยสลายผิวชั้นนอกของเส้นใยขนสัตว์ เกิดเป็นกรดไซติค (cysteic acid) และทำให้โปรตีนที่อยู่บนขนสัตว์เสียสภาพ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียความแข็งแรงและความต้านทานการหดตัวของเส้นใย

การใช้งานเอนไซม์แลกเคสจากเชื้อราขาว *T.versicolor* ร่วมกันเมดิเอเตอร์ได้รับการตีพิมพ์และมีการใช้งานกันในวงกว้าง Lantto และคณะยังได้พบว่าแลกเคสมีคุณสมบัติในการกระตุ้นเส้นใยขนสัตว์หากมีการใช้ร่วมกับเมดิเอเตอร์ที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้เอง การใช้งานแลกเคสเพื่อป้องกันการหดตัวของเส้นใยขนสัตว์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับสภาพเส้นใยลิกโนเซลลูโลสด้วยแลกเคส

ในปี ค.ศ. 2000 Charker และ Ragauskas ได้ทำการศึกษาลิกนินที่สกัดมาจากเยื่อกระดาษโดยทำปฏิกิริยากับแลกเคสและตัวกลางที่ใช้ในการปรับสภาพ คือ HBT, NHA และ VA โครงสร้างของลิกนินที่ปรับสภาพด้วยแลกเคสและตัวกลางวิเคราะห์ด้วย C NMR และ P NMR แสดงให้เห็นถึงการหายไปของหมู่ฟีนอลิกของลิกนินที่ตำแหน่ง C-5 ได้ดีเท่ากับในกลุ่มของไฮดรอกซิลแบบเชิงเส้น และข้อมูลสเปรคตรัมของ C NMR ได้แสดงให้เห็นถึงการลดลงของหมู่เมธอกซีและการเพิ่มขึ้นอย่างมากของหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (Charker and Ragauskas, 2000)

ในปี ค.ศ. 2003 Kenealy และคณะได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นผิวของเยื่อกระดาษเพื่อเพิ่มความสามารถในการเชื่อมติด และความแข็งแรงรวมทั้งลดค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ โดยการศึกษานี้ได้ทำการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส (ต้นสนและสนพันธุ์สปรูซ) ด้วยแลกเคสและตัวกลางที่ได้รับการคัดเลือกแล้วเพื่อทำการเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวธรรมชาติของเยื่อกระดาษ โดยการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวนี้จะทำการพิจารณาจากจำนวนของเมทิลลีนบลู (สีย้อมประจุบวก) ที่สามารถรวมตัวกับเยื่อกระดาษที่มีความเป็นกรดซึ่งวิเคราะห์ได้จาก IGC (Inverse Gas

Chromatography) การรวมตัวของแลกเคสและตัวกลางขึ้นอยู่กับสมบัติของพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันของเนื้อเยื่อกระดาษที่ทำการทดสอบ การรวมตัวกับเมททิลลีนบลูเพิ่มขึ้นเมื่อมีการทำปฏิกิริยากับตัวกลางชนิดต่างๆ แต่ไม่สัมพันธ์โดยตรงกับการวิเคราะห์ลักษณะความเป็นกรดของเยื่อกระดาษที่วิเคราะห์ด้วย IGC โดยพบว่าในกรณีที่เติมกลางที่เป็นรีซอร์ซินอลจะทำให้การรวมตัวกับประจุบวกสูงมากที่สุด (Kenealy et al., 2003)

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยลิกโนเซลลูโลส

ในปี ค.ศ. 2005 Okieimen และคณะ ได้ทำการศึกษาเซลลูโลสที่ต่อกิ่งด้วยพอลิอะคริโลไนไตรล์และพอลิ-อะคริลิกแอซิด ในการกำจัดแคดเมียมและทองแดงในน้ำ พบว่าการต่อกิ่งดังกล่าวทำให้เซลูโลสสามารถดูดติดไอออนของโลหะหนักได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะไอออนและระดับของต่อกิ่ง นอกจากนี้เมื่อนำตัวดูดซับเซลลูโลสที่ถูกต่อกิ่งนี้กลับมาใช้ใหม่หลังจากที่ใช้ไปแล้ว 1 ครั้ง พบว่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงกว่าร้อยละ 10 แต่ก็สามารถฟื้นฟูสภาพการเป็นตัวดูดซับได้โดยใช้กรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร (Okieimen et al., 2005)

ในปี ค.ศ. 2005 Shin และ Rowell ได้ทำศึกษาการนำต้นสน *(juniperus monosperma)* ซึ่งเป็นลิกโนเซลลูโลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก มาใช้ในการจำกัดโลหะหนักในน้ำ โดยทำการดัดแปรต้นสนด้วยปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน จากผลการทดลองพบว่าต้นสนที่ศึกษาทั้งหมดสามารถดูดซับแคดเมียมได้รวดเร็วแต่การดูดซับได้ลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง เช่นเดียวกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ สนที่ผ่านปรับสภาพนี้มีความสามารถนำมาดูดซับแคดเมียมได้ถึง 2 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นสนธรรมดาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากหลังจากการทำซัลโฟเนชันแล้วหมู่คาร์บอกซีเลตจะลดลงแต่หมู่ซัลโฟนิกจะเพิ่มขึ้นทำให้สามารถยึดติดกับหมู่ของโลหะแคดเมียมได้ดีขึ้นนั่นเอง (Shin and Rowell, 2005)

ในปี พ.ศ. 2549 สิริกุลกันยาใช้เส้นใยปาล์มทั้งที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกและปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของรูพรุนของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพด้วยไฮโดรคลอริก (สิริกุลกันยา, 2549)

ในปี ค.ศ. 2008 Argun และคณะ ได้นำเม็ดของต้นสนที่ทำปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton) มาดูดซับไอออนของแคดเมียมและตะกั่ว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วอยู่ที่ 91 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 (Argun et al., 2008)

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 วัสดุ

1) เศษเส้นใยไผ่จากจังหวัดนครนายก ซึ่งเป็นเศษเส้นใยที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์หัตถกรรมพื้นบ้านหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ที่ได้รับความนิยมในท้องถิ่น

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

แหล่งที่มาและคุณภาพของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แหล่งที่มาและคุณภาพของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

สารเคมี	แหล่งที่มา/บริษัท	คุณภาพ
ซิงค์แอซีเทต ($(CH_3COOH)_2$ $Zn{\cdot}2H_2O$)	Ajax Finechem	analytical reagent grade
เลดไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$)	Fluka chemika	analytical reagent grade
คอปเปอร์(II) ซัลเฟต ($CuSO_4{\cdot}5H_2O$)	Fluka chemika	analytical reagent grade
กรดแอซิติก (CH_3COOH)	J.T. Baker NEUTRASORB	analytical reagent grade
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	Ajax Finechem	analytical reagent grade

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไผ่

แหล่งที่มาและคุณภาพของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไผ่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แหล่งที่มาและคุณภาพของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย

สารเคมี	แหล่งที่มา/บริษัท	คุณภาพ
แลกเคส (DeniLite®II S)	โนโวไซม์	แอคติวิตี้ 120 หน่วย/กรัม
รีซอร์ซินอล (resorcinol)	Fluka chemika	analytical reagent rrade
โซเดียมแอซีเทตบัฟเฟอร์	-	-

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

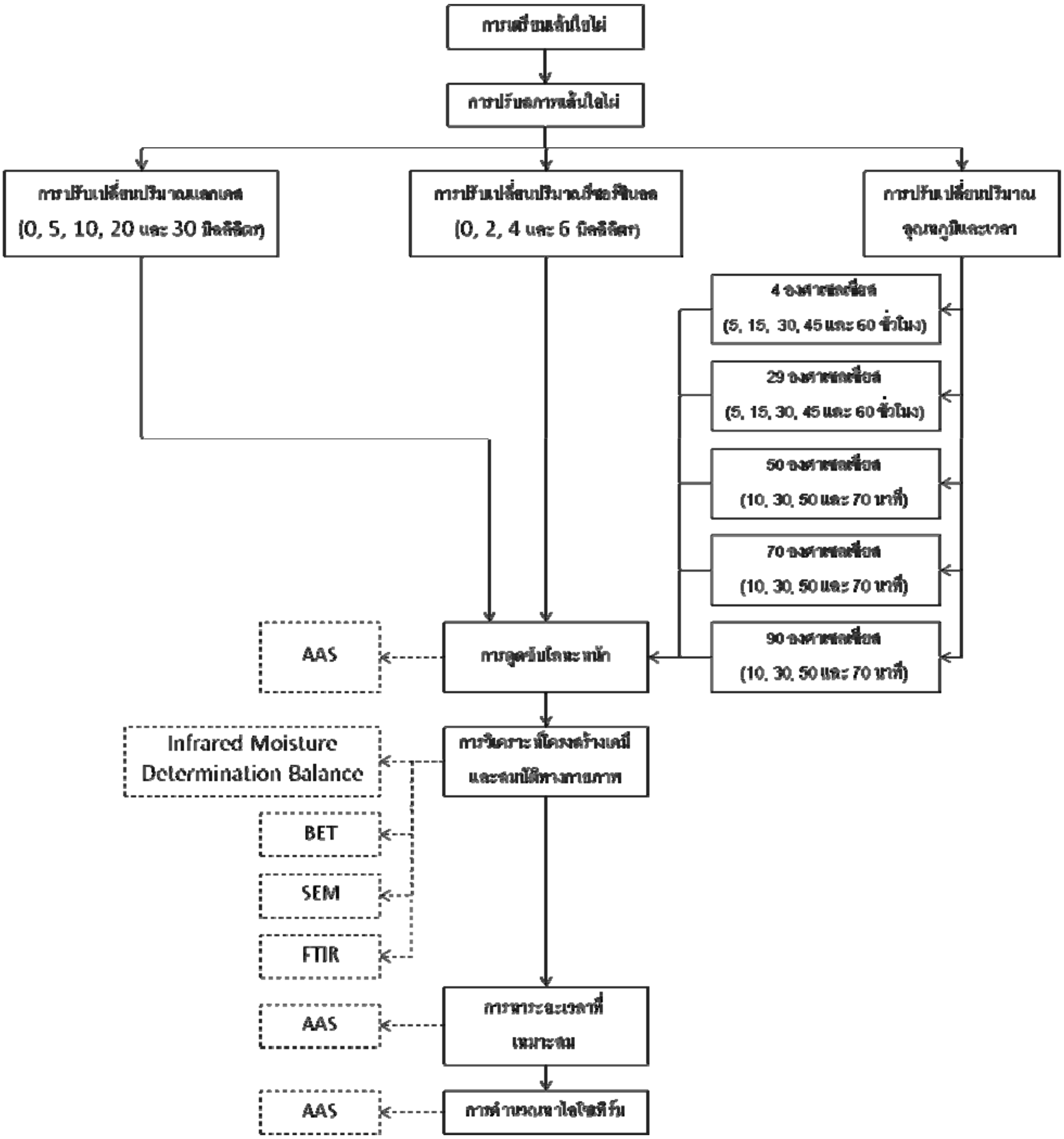
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศผู้ผลิต
เครื่องบดละเอียด (pulverizer)	-	FRITSCH	เยอรมนี
อ่างเขย่า	LABTEC L-24P-1	Nenave Lab Equipments	ไต้หวัน
เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง	UB - 10	Denver Instruments	เยอรมนี
เครื่องวิเคราะห์ค่าความชื้น (infrared moisture determination balance)	AND AD-4715	-	-
เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer, AAS)	AA 280 FS	Varian	ออสเตรเลีย
กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope with EDS Attachment, SEM-EDS)	JSM-6400	JEOL	ญี่ปุ่น
เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area analyzer)	SA3100	BECKMAN COULTER	สหรัฐอเมริกา
เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR)	Nicolet 6700	-	สหรัฐอเมริกา

3.3 การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ แสดงได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยไผ่ก่อนนำไปปรับสภาพ

นำเศษเส้นใยไผ่มาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-3 สัปดาห์ หลังจากนั้นบดและคัดแยกเส้นใยด้วยเครื่องบดให้มีขนาด 0.25 เมช แล้วนำไปเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์จนกว่าจะใช้งาน

3.3.2 การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไผ่

3.3.2.1 การเตรียมโซเดียมแอซีเทตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมล

1) นำสารละลายโซเดียมแอซีเทต ความเข้มข้น 2.75% (w/w) ปริมาตร 70.0 มิลลิลิตร กับสารละลายกรดแอซิติกความเข้มข้น 1.2% (w/w) ปริมาณ 30.0 มิลลิลิตร จากนั้นคนให้เข้ากัน
2) ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายผสม จนได้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5

3.3.2.2 การเตรียมสารละลายแลกเคส

นำแลกเคสมาละลายในสารละลายโซเดียมแอซีเทตบัฟเฟอร์ 0.2 โมล ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.3.2.1 ในอัตราส่วนของแลกเคส 1 กรัมต่อสารละลายบัฟเฟอร์ 60.0 มิลลิลิตร

3.3.2.3 การเตรียมรีซอร์ซินอลความเข้มข้น 0.3 โมล

ละลายรีซอร์ซินอล 3.30 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3.3.3 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคส

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสโดยมีรีซอร์ซินอลเป็นตัวกลาง (mediator) ที่ภาวะต่างๆ โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เวลา ปริมาณแลกเคสและรีซอร์ซินอลต่างๆ กัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี และเลือกภาวะที่เหมาะสมมาทำการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ

3.3.3.1 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

1) นำเส้นใยไผ่ที่บดแล้วจากข้อ 3.3.1 หนัก 4.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายแลกเคส 1 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 25 นาที แล้วเติมสารละลายรีซอร์ซินอล (0.3 โมล) ปริมาณ 2 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 25 นาที จากนั้นเติมสารละลายแลกเคสอีก 4 มิลลิลิตร แล้วเขย่าต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2) ปรับสภาพที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 ชั่วโมง
- ปรับสภาพเส้นใยที่อุณหภูมิ 50, 70, 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 30, 50 และ 70 นาที
- หลังจากนั้น นำเส้นใยไผ่มากรองออกจากสารละลาย ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องและเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์จนกว่าจะนำมาใช้งาน

3.3.3.2 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณรีซอร์ซินอล

1) นำเส้นใยไผ่ที่บดแล้วจากข้อ 3.3.1 หนัก 4.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายแลกเคส 1 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 25 นาที

2) เติมสารละลายรีซอร์ซินอล (0.3 โมล) ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 2 4 และ 6 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 25 นาที จากนั้นเติมสารละลายแลกเคสอีก 4 มิลลิลิตร แล้วเขย่าต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บไว้ในตู้เย็น (อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 15 ชั่วโมง หลังจากนั้น กรองแยกเส้นใยไผ่มากรองออกจากสารละลาย ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3.3 การปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณแลกเคส

ตารางที่ 3.4 ปริมาณการเติมสารละลายแลกเคสในการปรับสภาพเส้นใยไผ่โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณแลกเคส

แลกเคส (มิลลิลิตร)		
ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	รวม
0	0	0
4	6	10
7	13	20
10	20	30

1) นำเส้นใยไผ่ที่บดแล้วจากข้อ 3.3.1 หนัก 4.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายแลกเคสโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังตารางที่ 3.4 เมื่อเติมแลกเคสส่วนที่ 1 แล้ว เขย่าเป็นเวลา 25 นาที แล้วเติมสารละลายรีซอร์ซินอล (0.3 โมล) ปริมาณ 2 มิลลิลิตร เขย่าต่อไปอีก 20 นาที

2) เติมสารละลายแลกเคสส่วนที่ 2 ลงไปอีกแล้วเขย่าต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บไว้ในตู้เย็น (อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

<u>หมายเหตุ</u> เส้นใยไผ่ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ จะใช้สัญลักษณ์แทนดังต่อไปนี้

B_{intial}	แทนเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ
$B_{4\ °C,5\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
$B_{4\ °C,15\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
$B_{4\ °C,30\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง
$B_{4\ °C45\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 ชั่วโมง
$B_{4\ °C,60\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ชั่วโมง
$B_{29\ °C,5\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
$B_{29°C,15\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
$B_{29°C,30\ hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง
$B_{29\ °C,45hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 ชั่วโมง
$B_{29\ °C,60hr}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ชั่วโมง
$B_{50°C,10min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
$B_{50°C,30\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
$B_{50°C,50\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที
$B_{50°C,70\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 นาที
$B_{70°C,10min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
$B_{70°C,30\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
$B_{70°C,50\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที
$B_{70°C,70\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 นาที
$B_{90°C,10min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
$B_{90°C,30\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
$B_{90°C,50\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที
$B_{90°C,70\ min}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 นาที
B_{nonre}	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยไม่เติมรีซอร์ซินอล
$B_{re\ 2ml}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมรีซอร์ซินอล 2 มิลลิลิตร

$B_{re\ 4ml}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมรีซอร์ซินอล 4 มิลลิลิตร
$B_{re\ 6ml}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมรีซอร์ซินอล 6 มิลลิลิตร
B_{nonlac}	แทนเส้นใยไผ่ที่ผ่าปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยไม่เติมแลกเคส
$B_{lac\ 10ml}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมแลกเคส 10 มิลลิลิตร
$B_{lac\ 20ml}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมแลกเคส 20 มิลลิลิตร
$B_{lac\ 30ml}$	แทนเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมแลกเคส 30 มิลลิลิตร

3.3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายซิงค์แอซิเทต ($(CH_3COOH)_2\ Zn{\cdot}2H_2O$), สารละลายเลดไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) และ สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ($CuSO_4{\cdot}5H_2O$) ที่ความเข้มข้น 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0

3.4 การตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ภาวะต่างๆ โดยการนำเส้นใยไผ่ดังกล่าวใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อให้เส้นใยดูดซับโลหะหนัก แล้วจึงนำน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักไอออนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.4.1 การดูดซับโลหะหนักของเส้นใยไผ่

1) ใส่เส้นใยไผ่หนัก 0.50 กรัม ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 50.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ข้อ 1)
3) เขย่าของผสมในข้อ 2) ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4) เมื่อเขย่าครบ 2 ชั่วโมงแล้วนำมากรองแยกเส้นใยไผ่ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

5) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักไอออนโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักไอออนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

รูปที่ 3.2 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักไอออนของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS ได้ใช้เทคนิค flame atomic absorption (FAA) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สารละลายตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟ โดยดูดสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์เข้าไปในเปลวไฟของอากาศ-อะเซทิลีน ภายในเครื่อง AAS พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารละลายเกิดกระบวนการแตกตัว (dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (atomization) อยู่ที่สภานะพื้น จากนั้นอะตอมที่สภานะพื้นจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะกระตุ้น (excited state) โดยการดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก(hollow cathode lamp) ที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ กล่าวคือ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน โดยธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีที่ช่วงความยาวคลื่นต่างกัน เนื่องจากแสงที่ความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นโดยที่ความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น spectroscopic line ของอะตอมมิกสเปกตรัม ที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด สำหรับการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายนั้น โดยความเข้มข้นของธาตุในสารละลายหาได้โดยการเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (ชนัญชิดา, 2549)

นำค่าปริมาณโลหะหนักไอออนมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออน โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออน (\%)} = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad (3.1)$$

โดย

C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเศษเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

3.5.1 การวัดค่าความชื้น

การวัดค่าความชื้นของเส้นใยด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอินฟราเรด (infrared moisture determination balance) รุ่น AND AD-4715 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักอินฟาเรด

3.5.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของรูพรุน (pore diameter) ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของรูพรุนด้วยเครื่อง BET Surface area analyzer อาศัยหลักการโดยให้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ดูดซับก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซบางชนิดบริเวณผิวหน้าและสามารถแทรกซึมเข้าไปทั่วบริเวณของรูพรุนได้ ซึ่งเทคนิคที่เลือกใช้นี้เป็นเทคนิคที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นสารถูกดูดซับ โดยการทดสอบจะแสดงผลเป็น adsorption

isotherm ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับที่เพิ่มขึ้นกับความดันสัมพัทธ์ (p/p0) ของสารตัวอย่าง ในการทดสอบจะมีโพรบ (probe) ใส่สารตัวอย่าง 2 โพรบ โพรบหนึ่งใส่สารตัวอย่างที่ต้องการวัดส่วนอีกโพรบไม่ต้องใส่สารตัวอย่างใช้สำหรับเป็นตัวเปรียบเทียบ ขั้นตอนการทดสอบในขั้นแรกคือให้ความร้อนกับสารตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารถูกดูดซับอื่นๆ ออกไปเพื่อให้แน่ใจว่าผิวหน้าของสารที่ต้องการวิเคราะห์ไม่มีโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่เหลือค้างบริเวณนั้น จากนั้นทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อทำให้ภายในโพรบไม่มีโมเลกุลของก๊าซชนิดอื่น แล้วทำการทดสอบที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ (cryogenic bath) โดยใช้ไนโตรเจนเหลว การทดสอบทำโดยให้ก๊าซไนโตรเจนผ่านเข้ามาในโพรบทั้งสองที่ความดันค่าหนึ่ง เมื่อผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้ามาในโพรบที่มีสารตัวอย่าง โมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนจะถูกดูดซับด้วยสารตัวอย่างทำให้ความดันภายในโพรบลดลงจนกระทั่งคงที่ ในขณะที่โพรบสารตัวอย่างที่ไม่มีสารตัวอย่าง ความดันจะไม่ลดลง เครื่องจะทำการบันทึกผลที่ได้ จากนั้นเครื่องจะปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก เป็นเช่นนี้ไปจนกระทั่งความดันภายในโพรบที่มีสารตัวอย่างไม่ลดลง แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับก๊าซไนโตรเจนอีกแล้ว เครื่องจะแสดงผลเป็น adsorption isotherm และทำการคำนวณออกมาเป็นขนาดของรูพรุนและ BET surface area (ศุภรัตน์, 2546)

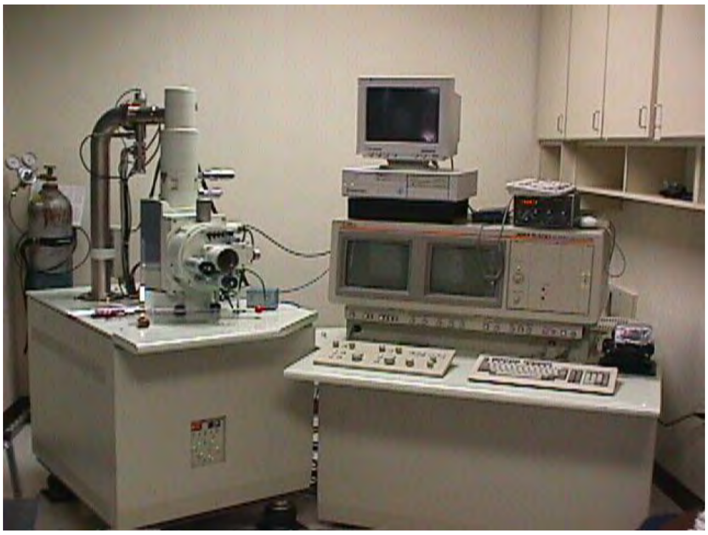
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area Analyzer)

ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของรูพรุนด้วยเครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิว (BET surface area analyzer) รุ่น SA3100 ของบริษัท BECKMAN COULTER ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยให้ความร้อนแก่เส้นใยในบรรยากาศก๊าซฮีเลียมที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำที่อยู่ที่ผิวหน้าของเส้นใยออกไป จากนั้นทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยชั่งน้ำหนักของเส้นใยและบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำโพรบเส้นใยตัวอย่างใส่ลงในส่วนที่สองหรือส่วนดูดซับ ซึ่งมีไนโตรเจนเหลวบรรจุอยู่ในภาชนะ (dewar) จากนั้นสั่งเครื่องให้เริ่มทดสอบ ภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวจะถูกยกขึ้นเพื่อให้โพรบเส้นใยตัวอย่างแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว โดยต่อโพรบเส้นใย

ตัวอย่างเข้ากับส่วนที่ทำสุญญากาศ ไนโตรเจนจะถูกดูดซับที่ -196 องศาเซลเซียส ที่ความดันย่อยของไนโตรเจนค่าต่างๆ ในหน่วยปริมาตร เครื่องจะทำการบันทึกค่าความดันที่ได้จนกระทั่งความดันภายในโพรบเส้นใยไม่ลดลง เครื่องจะแสดงผลเป็น adsorption isotherm และทำการคำนวณออกมาเป็น BET surface areaและขนาดของรูพรุน

3.5.3 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นการตรวจดูลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของเส้นใยไผ่ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการปรับสภาพโดยทำการเคลือบผิวเส้นใยไผ่ด้วยไอของทองคำเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างนำไฟฟ้าได้แล้วนำมาส่องดูพื้นผิวโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 700 และ 3000 เท่า ภายใต้ภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR)

รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไผ่ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการปรับสภาพด้วยเครื่อง FT-IR รุ่น Nicolet 6700 โดยทำการทดสอบด้วยโหมด transmission ในช่วง wavenumber 4000 – 400 cm^{-1} จำนวนรอบของการสแกนเท่ากับ 16 ซึ่งเส้นใยที่นำมาทดสอบนั้นมีลักษณะเป็นผง ดังนั้นต้องเตรียมชิ้นทดสอบโดยผสมกับ KBr แล้วบรรจุลงในภาชนะที่ใช้เตรียมตัวอย่างพร้อมลูกบด เขย่าให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที แล้วอัดเป็นแผ่นวงกลมบางๆ จากนั้นนำไปบรรจุลงในที่ยึดชิ้นตัวอย่างของเครื่อง ทำการสแกนที่ช่วง wavenumber และจำนวนสแกนที่เท่ากัน นำกราฟที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของเส้นใยไผ่

3.6 การศึกษาผลของระยะเวลาต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

1) ใส่เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพหนัก 0.50 กรัม ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะทองแดงไอออนปริมาตร 50.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1)
3) เขย่าสารละลายในข้อ 2) ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 4 6 8 และ 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4) เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำมากรองแยกเส้นใยไผ่ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์
5) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงไอออนโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอพซอบชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และบันทึกผล

6) เปลี่ยนชนิดของโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์จากทองแดงเป็น ตะกั่ว และสังกะสี แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันตั้งแต่ข้อ 1) ถึง 5)

3.7 การวิเคราะห์ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆด้วยเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ

1) ใส่เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพหนัก 0.50 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5, 20, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ในข้อที่ 1)
3) เขย่าของผสมในข้อ 2) ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4) เมื่อเขย่าครบ 2 ชั่วโมงแล้วนำมากรองแยกเส้นใยไผ่ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์
5) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วไอออนโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และบันทึกผล
6) นำค่าปริมาณโลหะหนักที่ได้มาคำนวณหาปริมาณสารถูกดูดซับ/น้ำหนักตัวดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม ตามสมการที่ 3.2

$$q_e=(C_i - C_e)V/m \qquad (3.2)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_i = ความเข้มข้นโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (ลิตร)

m = น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

7) นำค่า q_e ที่ได้ไปแทนที่ในสมการไอโซเทิร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิกดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$C_e/q_e = (1/bX_m)+(C_e/X_m) \qquad (3.3)$$

โดยที่

q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ต่อหน่วยน้ำหนักของของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

b = ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K + (1/n) \log C_e \tag{3.4}$$

โดยที่

q_e = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

K = สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย

C_c= ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

n = ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการฟรุนดลิก

8) เปลี่ยนชนิดของโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์จากตะกั่วเป็น สังกะสี และทองแดง แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันตั้งแต่ข้อ 1) ถึง 7)

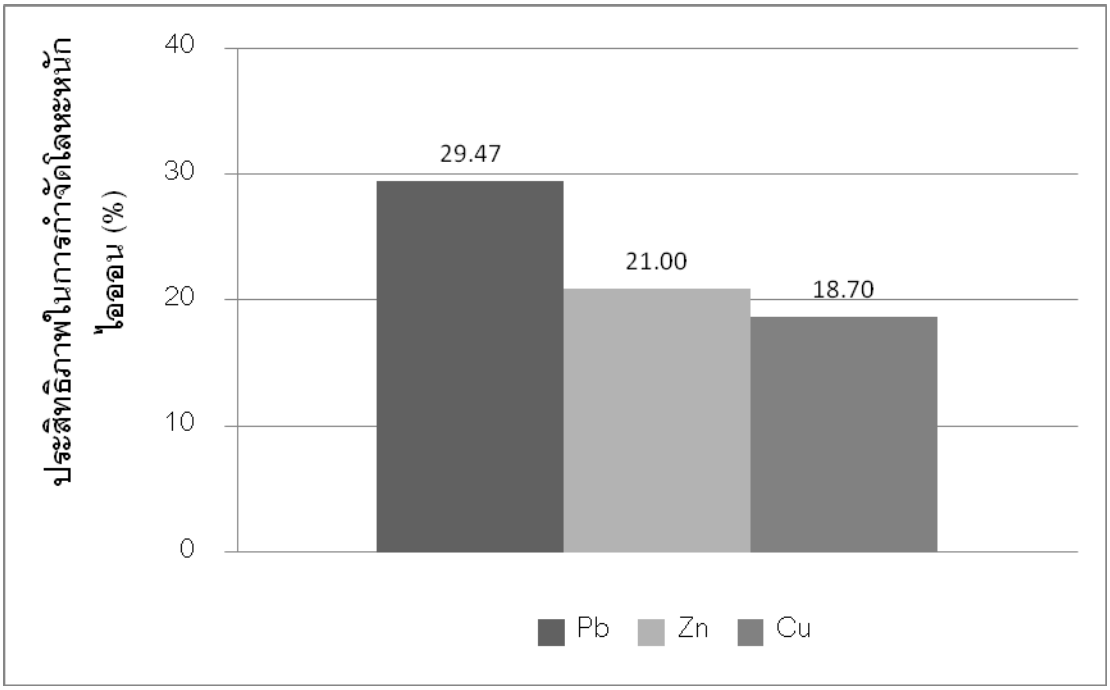
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการนำเส้นใยไผ่มาปรับสภาพด้วยแลกเคสที่ภาวะต่างๆโดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เวลา ปริมาณแลกเคส และปริมาณรีซอร์ซินอล ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไผ่ภายหลังการปรับสภาพรวมทั้งสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่นลักษณะสัณฐานวิทยา พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของเส้นใยไผ่ ตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออน 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพรวมทั้งเลือกภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพของเส้นใยไผ่แล้วนำมาวิเคราะห์หาไอโซเทิร์มในการดูดซับโลหะหนักไอออน (ค่าผลการทดลองต่างๆแสดงดังภาคผนวก ก และ ข)

4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

4.1.1 เส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

ประสิทธิภาพของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนชนิดต่างๆได้แก่สังกะสี ตะกั่ว และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้น 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ($B_{initial}$)

สามารถกำจัดตะกั่วสูงที่สุด 29.47% รองลงมาได้แก่สังกะสี 21.00% และตามด้วย ทองแดงเพียง 18.7%

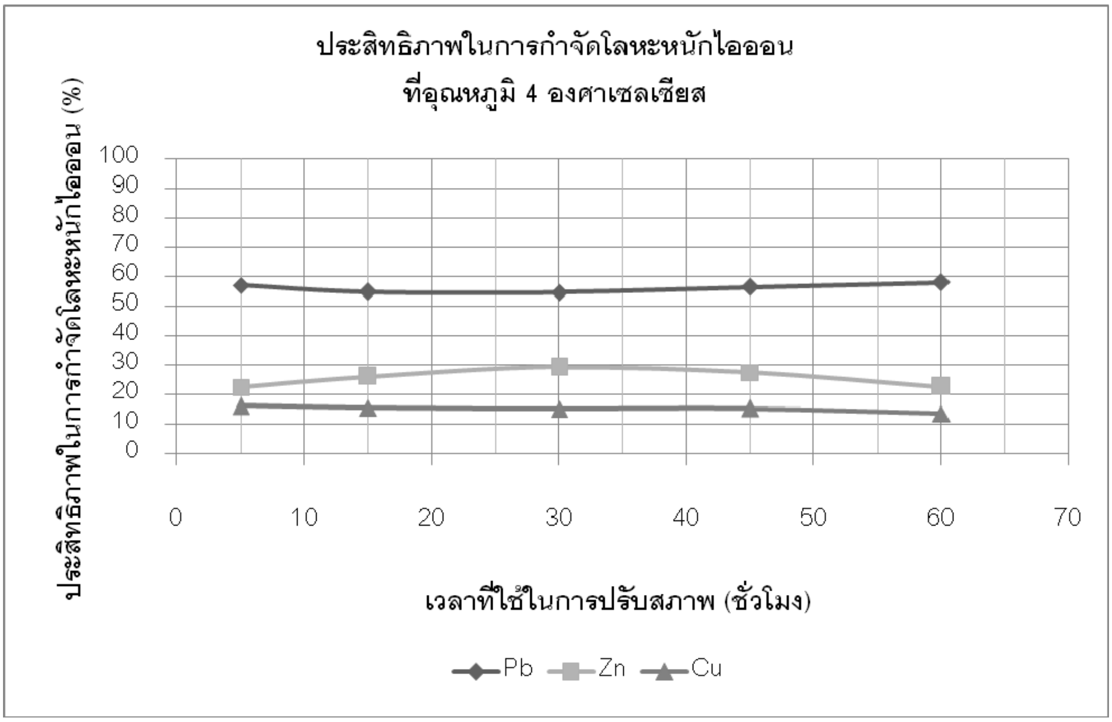
4.1.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยไผ่

รูปที่ 4.2 – 4.6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพด้วยแลกเคสและรีซอร์ซินอลที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกัน โดยใช้สารละลายแลกเคส 5 มิลลิลิตร รีซอร์ซินอล 2 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 30, 50 และ 70 นาที เห็นได้ชัดเจนว่า เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและสังกะสีไอออนสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ยกเว้นในการกำจัดทองแดงไอออนพบว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงไอออนใกล้เคียงกับเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ

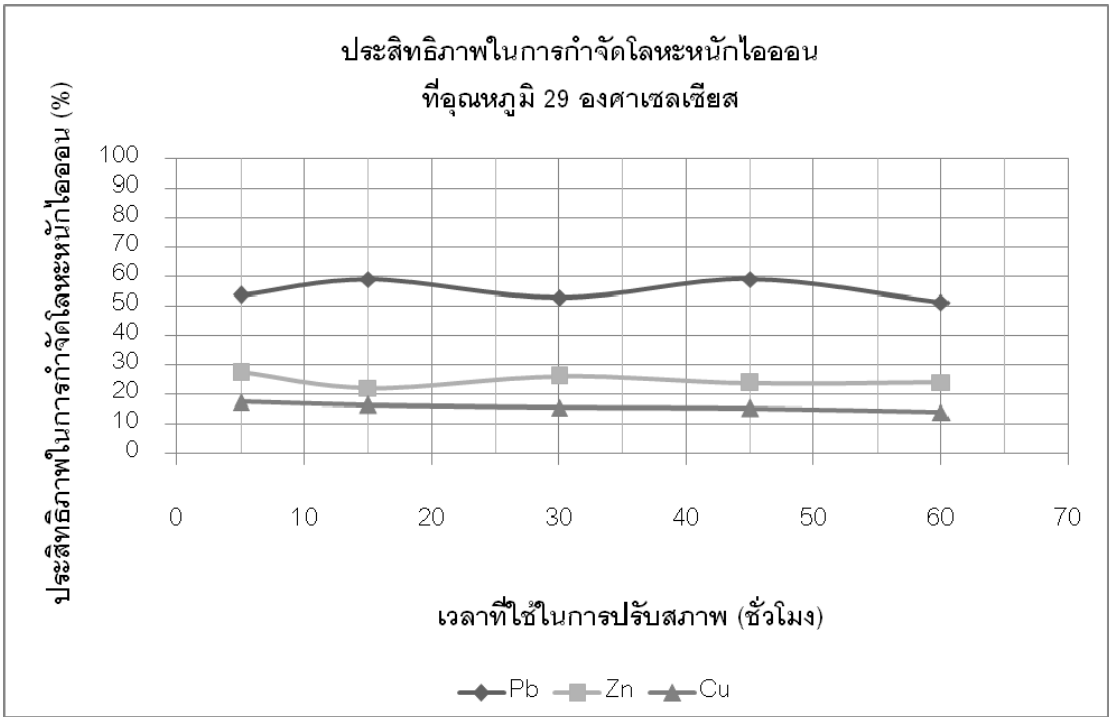
สำหรับเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิเดียวกันที่ระยะเวลาต่างๆ มีแนวโน้มของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะแต่ละชนิดค่อนข้างคงที่เมื่อระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น และหากพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แต่ละอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ พบว่าตะกั่วมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนสูงสุดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 58.39% สำหรับที่อุณหภูมิห้องมีค่าเฉลี่ยเป็น 55.20% โดยค่าเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 50.13% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะไอออนแต่ละอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของสังกะสีและทองแดงพบว่ามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

อุณหภูมิและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยไผ่พบว่าให้ผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะไอออนแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตะกั่วไอออนเป็นโลหะที่ถูกเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพดูดซับมากที่สุด รองมาคือสังกะสี และทองแดง ตามลำดับ

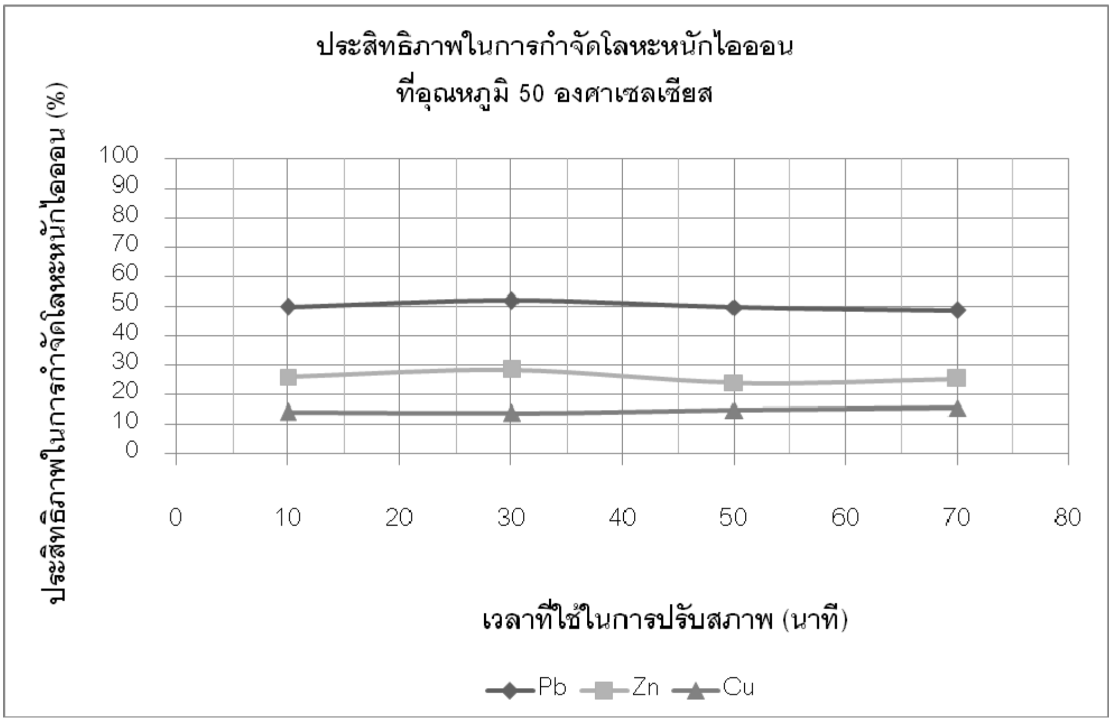
ดังนั้นหากเมื่อพิจารณาถึงการประหยัดพลังงานและความสะดวกในการปรับสภาพเส้นใย การปรับสภาพเส้นใยที่อุณหภูมิห้องจึงเป็นภาวะที่น่าจะนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีและมีความเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด ต่อมาพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพที่พิจารณาจากการเปรียบเทียบชนิดของโลหะหนักไอออนที่สามารถดูดซับได้สูงสุดนั้นคือตะกั่ว ที่ใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 ชั่วโมง มาทำการทดลองต่อไป



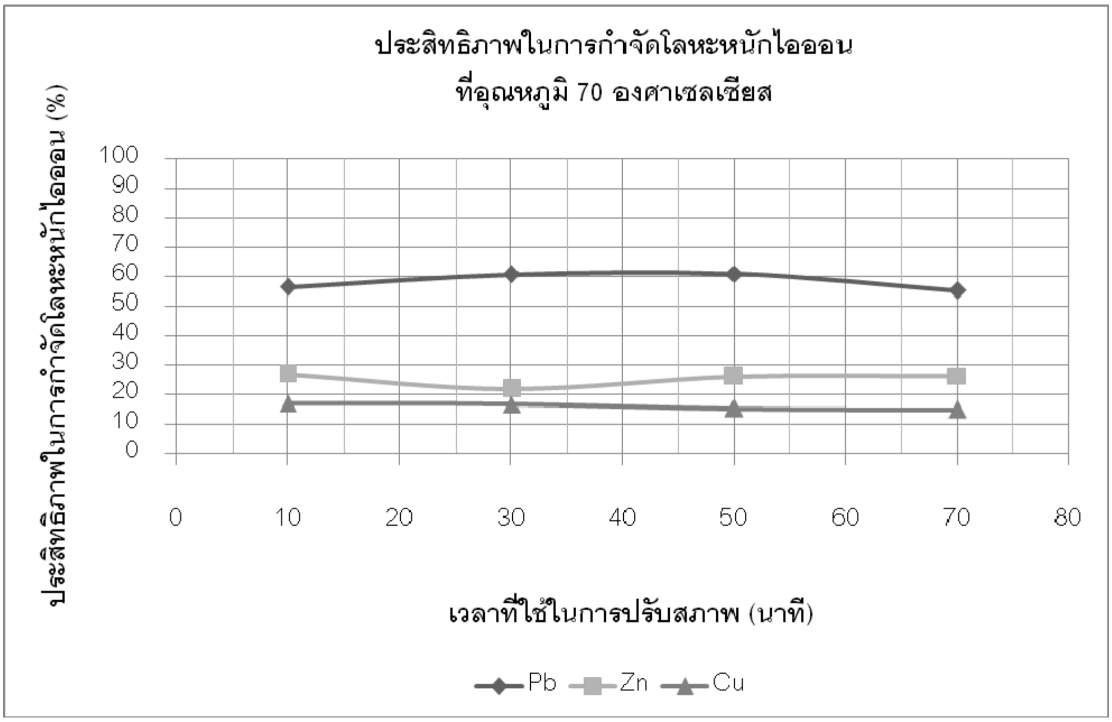
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ



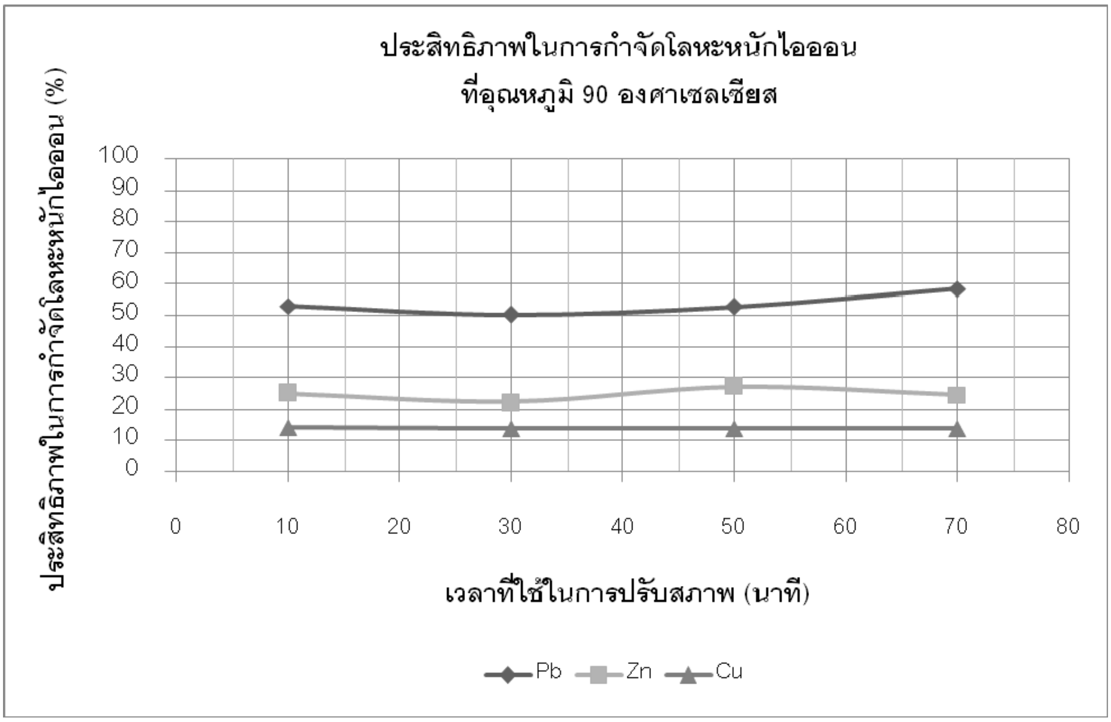
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ



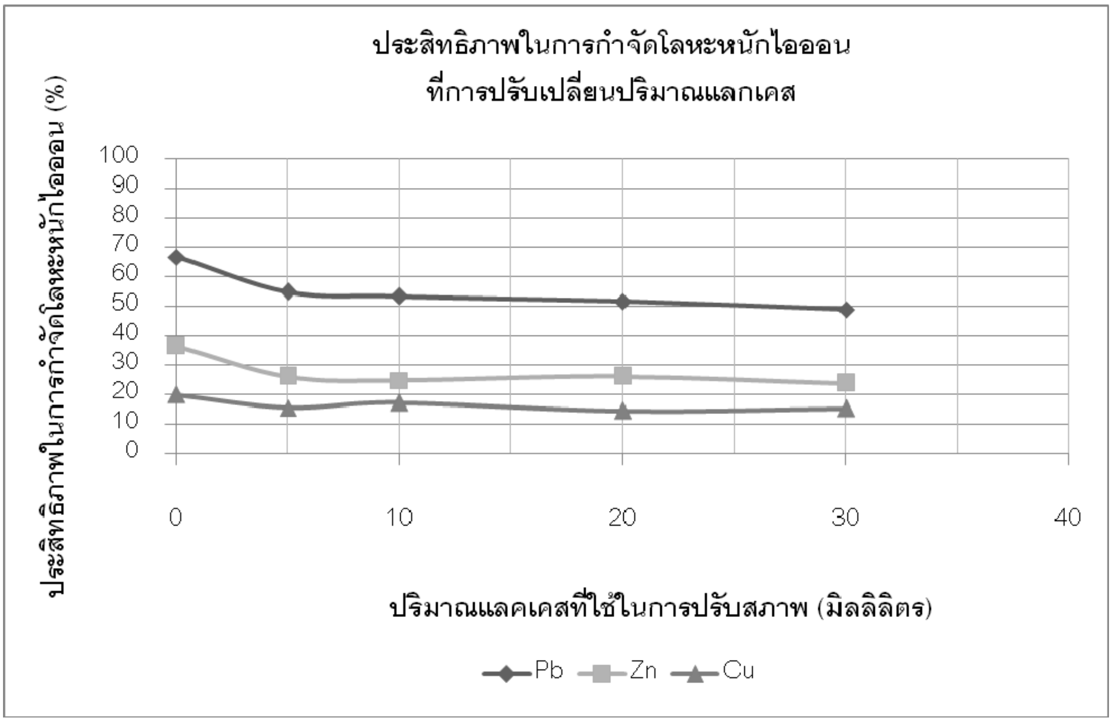
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยแลกเคสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ

4.1.3 ผลของปริมาณแลกเคสในการปรับสภาพเส้นใยไผ่

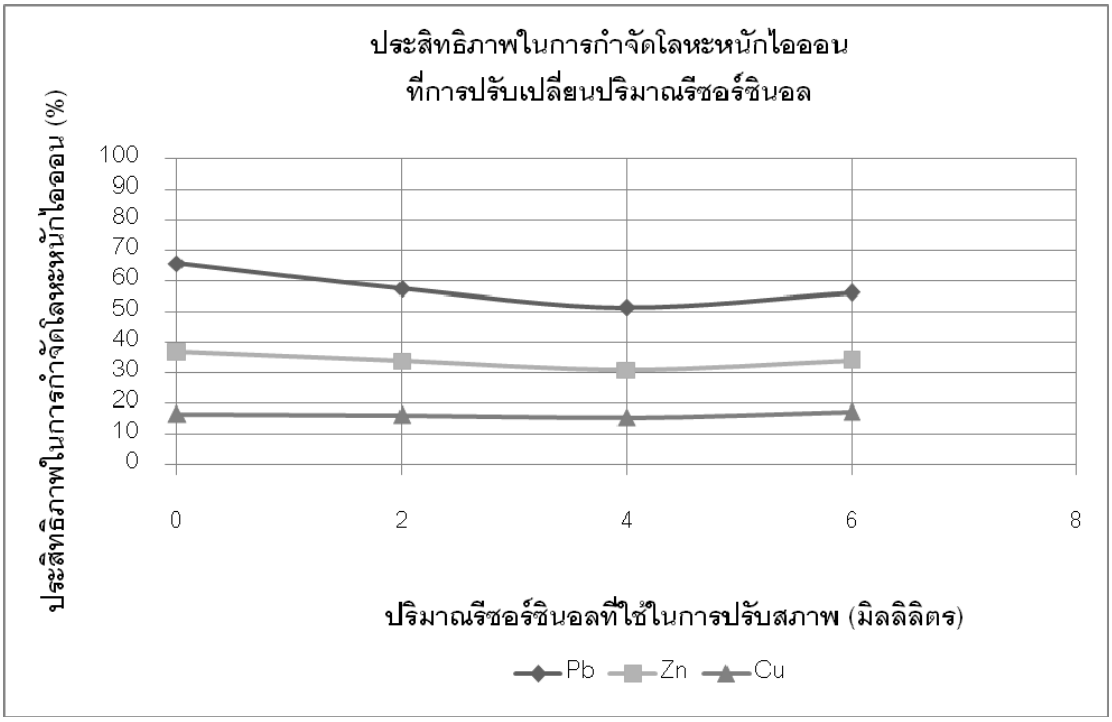
รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณแลกเคส 0, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร และรีซอร์ซินอล 2 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 15 ชั่วโมง พบว่าในการปรับสภาพเส้นใยไผ่หากไม่เติมแลกเคสแล้วเส้นใยไผ่จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วไอออนสูงที่สุดถึง 66.77% สูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 55.86% แต่เมื่อปริมาณแลกเคสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไอออนของเส้นใยไผ่ได้ลดลงแต่ก็ยังคงสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยเมื่อเติมแลกเคสปริมาณ 5 มิลลิลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไอออนลดลงมากถึง17.83%และค่อนข้างคงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณแลกแคสมากขึ้น และเช่นเดียวกันสำหรับสังกะสี เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพโดยไม่เติมแลกเคสมีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีไอออนสูงที่สุดถึง 36.42% สูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 42.33% แต่เมื่อปริมาณแลกเคสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีไอออนของเส้นใยไผ่ได้ลดลงแต่ก็ยังคงสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างไรก็ตามสำหรับทองแดงแล้วพบว่าการปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสไม่ได้ทำให้สามารถดูดซับโลหะไอออนได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสที่ปริมาณต่างๆ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 ชั่วโมง

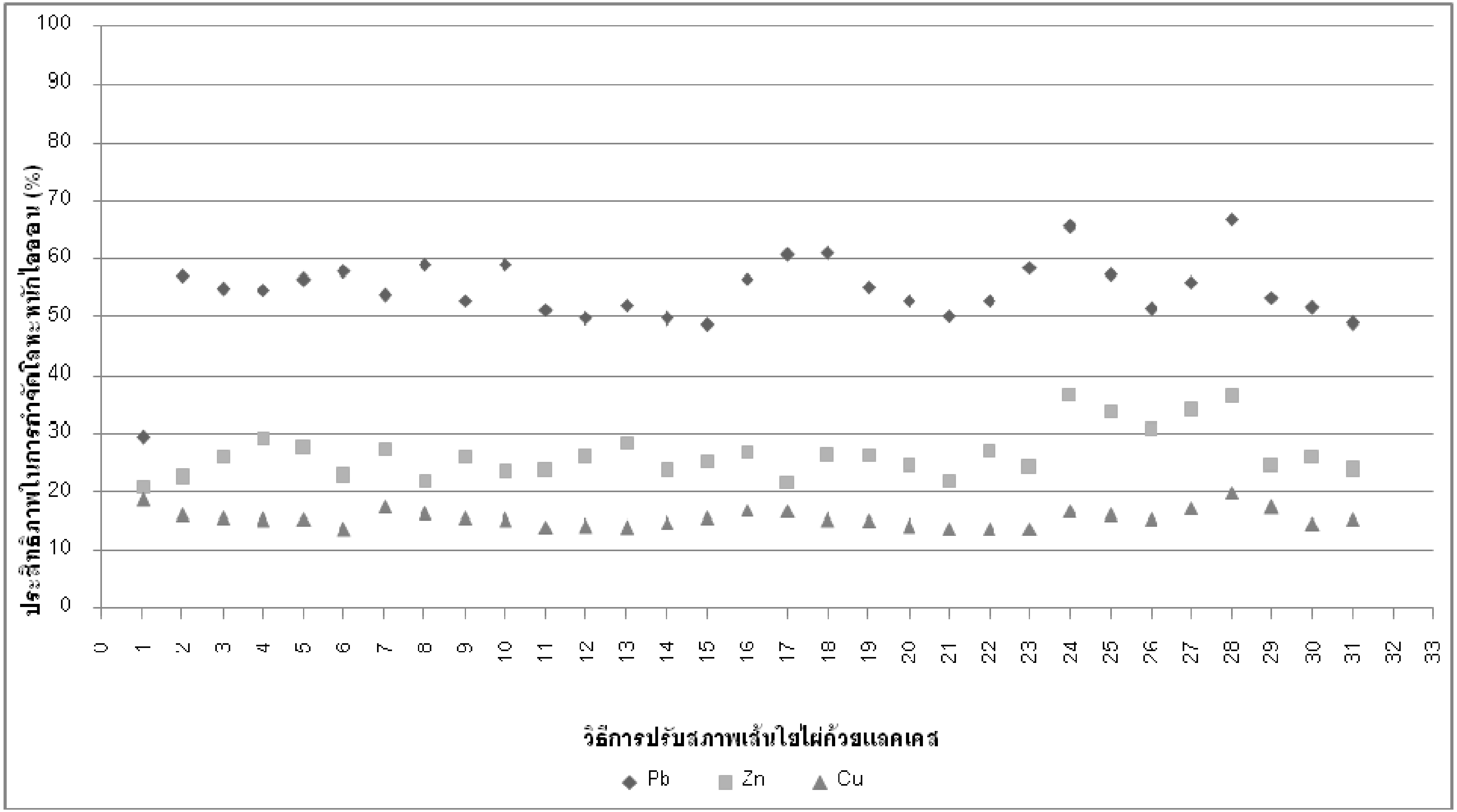
4.1.4 ผลของปริมาณรีซอร์ซินอลในการปรับสภาพเส้นใยไผ่

รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณรีซอร์ซินอล 0, 2, 4 และ 6 มิลลิลิตร และแลกเคส 5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 15 ชั่วโมง พบว่าในการปรับสภาพเส้นใยไผ่หากไม่เติมรีซอร์ซินอลแล้วเส้นใยไผ่จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วไอออนสูงที่สุดถึง 65.72% สูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 55.15% แต่เมื่อปริมาณรีซอร์ซินอลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไอออนของเส้นใยไผ่มีแนวโน้มลดลงแต่ก็ยังคงสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะปรับสูงขึ้นเมื่อปริมาณรีซอร์ซินอลเพิ่มขึ้นเป็น 6 มิลลิลิตร และเช่นเดียวกันสำหรับสังกะสี เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพโดยไม่เติมรีซอร์ซินอลมีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีไอออนสูงที่สุดถึง 36.72% สูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 42.81% แต่เมื่อปริมาณรีซอร์ซินอลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีไอออนของเส้นใยไผ่ได้ลดลงแต่ก็ยังคงสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะปรับสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณรีซอร์ซินอลเพิ่มขึ้นเป็น 6 มิลลิลิตร อย่างไรก็ตามสำหรับทองแดงแล้วพบว่าการปรับสภาพเส้นใยไผ่ด้วยแลกเคสและรีซอร์ซินอลไม่ได้ทำให้สามารถดูดซับโลหะได้เพิ่มขึ้นเลย



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยรีซอร์ซินอลที่ปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 ชั่วโมง

จากผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และการปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้แลกเคสและรีซอร์ซินอลในการปรับสภาพเส้นใยไผ่ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว สังกะสีและทองแดงไอออน และการพิจารณาในด้านพลังงาน ความสะดวกในการปรับสภาพ การใช้สารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ จึงเลือกภาวะในการปรับสภาพเส้นใยไผ่เพื่อนำไปศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ คือการปรับสภาพเส้นใยไผ่ที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 45 ชั่วโมง ด้วยแลกเคส 5 มิลลิลิตรเพียงอย่างเดียวโดยไม่เติมรีซอร์ซินอล และใช้สัญลักษณ์เป็น B_x



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ปรับสภาพด้วยแลกเคสที่สภาวะต่างๆ

4.2 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเศษเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

ในการตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยไผ่ ได้ทำการตรวจสอบเส้นใยไผ่ 4 ชนิด ได้แก่

1. เส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ใช้สัญลักษณ์เป็น $B_{initial}$

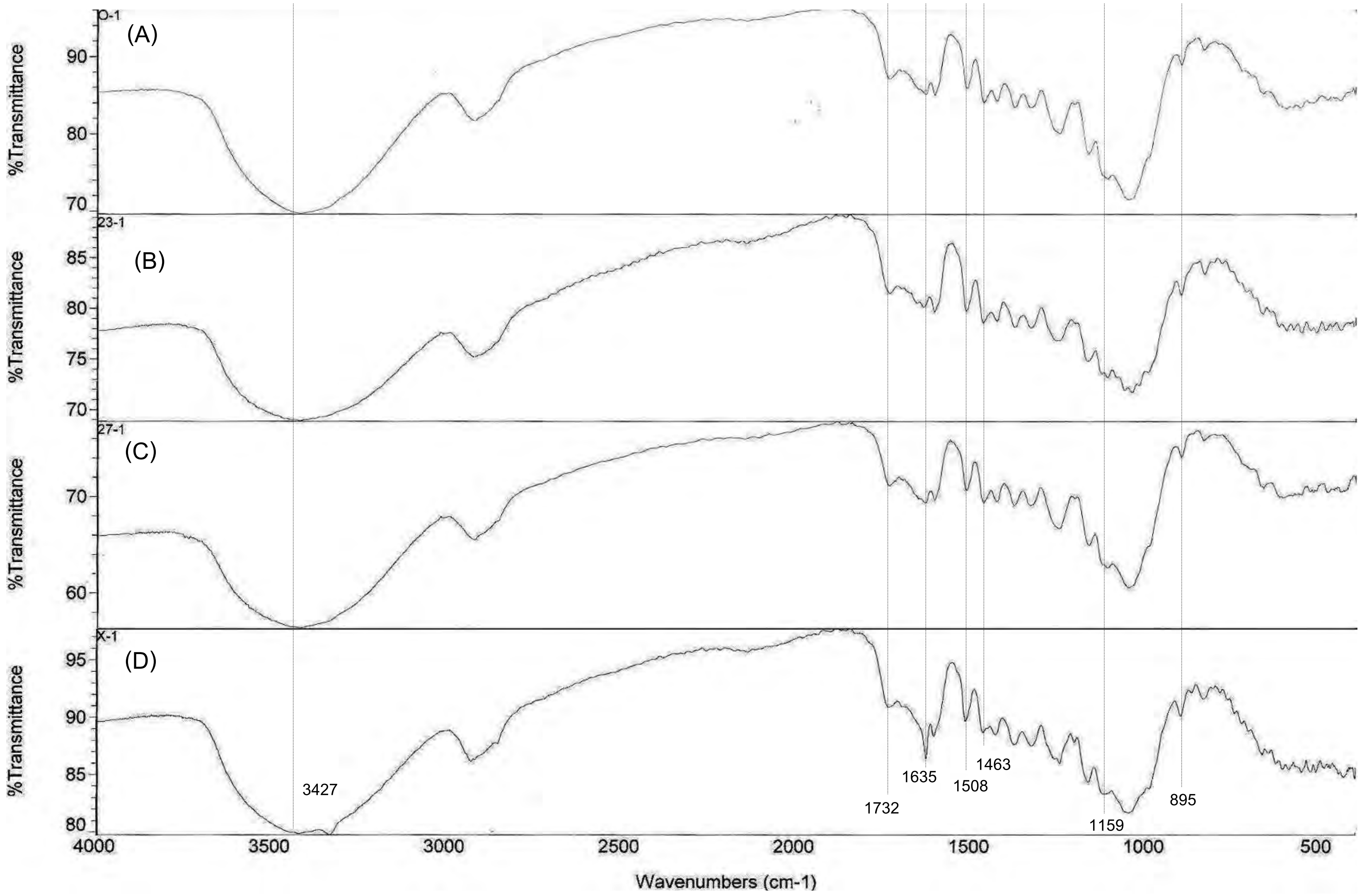
2. เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมแลกเคสปริมาณ 5 มิลลิลิตร โดยไม่เติมรีซอร์ซินอล ใช้สัญลักษณ์เป็น B_{nonre}

3. เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยเติมรีซอร์ซินอลปริมาณ 2 มิลลิลิตร โดยไม่เติมแลกเคส ใช้สัญลักษณ์เป็น B_{nonlac}

4.เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 45 ชั่วโมง และทำการเติมแลกเคสปริมาณ 5 มิลลิลิตร โดยไม่เติมรีซอร์ซินอล ใช้สัญลักษณ์ B_X

4.2.1 โครงสร้างทางเคมี

เมื่อนำเส้นใย $B_{initial}$,B_{nonre},B_{nonlac} และ B_x มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิค FT-IR และเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของทั้งเส้นใยไผ่ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพทั้งหมดปรากฏพีกของหมู่ฟังก์ชันต่างๆเหมือนกันหมด ซึ่งต่างก็แสดงพีกที่ตำแหน่ง 3427 cm^{-1} ที่เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่-OH สำหรับพีกที่ตำแหน่ง 1159 และ 895 cm^{-1} แสดงหมู่ C-O-C ของพันธะเชื่อมต่อของหน่วยเซลลูโลส และตำแหน่งพีกที่ 1732 cm^{-1} แสดงหมู่ C=O ของเฮมิเซลลูโลส ส่วนพีกที่ตำแหน่ง 1508 cm^{-1} และ 1463 cm^{-1} แสดงหมู่ C=C ของลิกนิน (Phai, 2009) (Ates, 2009) ซึ่งพีกต่างๆที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพเป็นสารประกอบลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบหลักของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน อย่างไรก็ตามตัวอย่างเส้นใย B_x ที่เป็นเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยแลกเคสปริมาณ 5 มิลลิลิตร โดยไม่เติมรีซอร์ซินอล ที่ระยะเวลา 45 ชั่วโมง มีความเข้มของพีกที่ตำแหน่ง 1635 cm^{-1} มากกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่แลกเคสทำให้เส้นใยไผ่มีหมู่คาร์บอซิลเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่า



(A) คือ $B_{initial}$ (B) คือ B_{nonre} (C) คือ B_{nonlac} (D) คือ B_x

รูปที่ 4.10 FTIR Spectra ของเส้นใยไผ่

4.2.2 ความชื้นของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

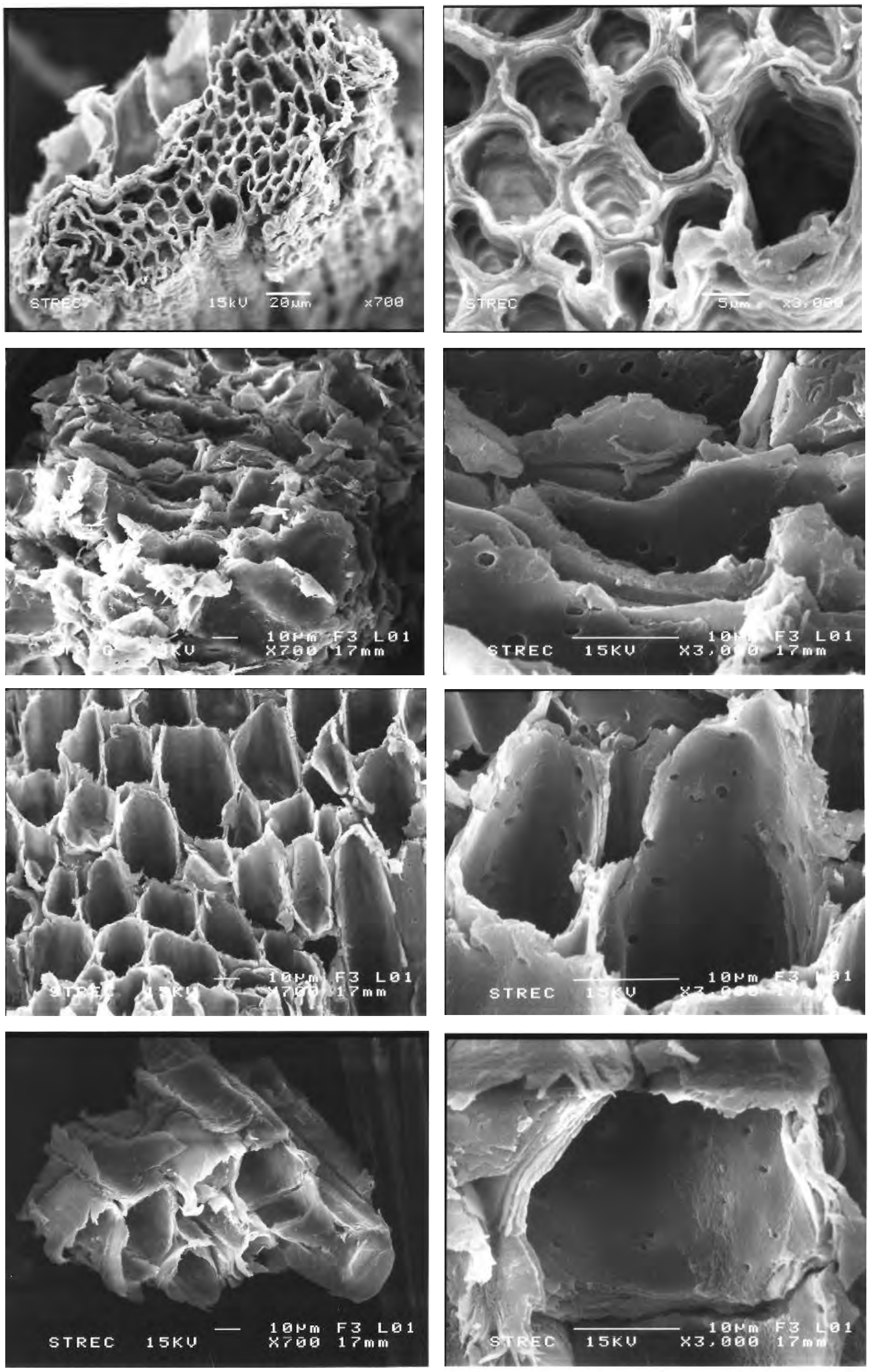
จากผลการตรวจวัดความชื้นของเส้นใยไผ่ด้วยเครื่องชั่ง Infrared Moisture Determination Balance ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในดังตารางที่ 4.1 พบว่าเส้นใย B_x มีค่าความชื้นสูงสุดคือ 16.33% รองลงมาต่อมาคือเส้นใย B_{nonlac}15.04% และ B_{nonre} 13.26% ตามลำดับ โดยเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีค่าความชื้นต่ำที่สุดคือ 9.85%

ตารางที่ 4.1 ความชื้นของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

ชนิดของเส้นใยไผ่	ค่าความชื้น (%)
$B_{initial}$	9.85
B_{nonre}	13.26
B_{nonlac}	15.04
B_x	16.33

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

นำ $B_{initial}$,B_{nonre},B_{nonlac} และ B_x มาทำการศึกษาลักษณะพื้นผิววัสดุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 700 และ 3000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าส่วนภายในเส้นใยไผ่ $B_{initial}$ มีลักษณะเป็นท่อลำเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 μm ส่วนบริเวณชั้นนอกของเส้นใยมีลักษณะผิวขรุขระไม่มีรูพรุนเกิดขึ้น สำหรับเส้นใย B_{nonre} มีลักษณะภายในของเส้นใยเป็นท่อลำเรียงมีหน้าตัดที่เป็นรูปไข่ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 μm ลักษณะชั้นนอกพองซ้อนทับกันและหากพิจารณาภายในท่อลำเรียงจะมีรูพรุนขนาดเล็กๆที่มีความลึกอยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับเส้นใย B_{nonlac} มีลักษณะภายในของเส้นใยเป็นท่อลำเรียงขนาดเส้นผ่านประมาณ 20 μm ซึ่งภายในท่อจะมีขนาดรูพรุนเล็กๆมีความลึกน้อยกว่า B_{nonre} ส่วนเส้นใย B_x ภายในของเส้นใยมีลักษณะเป็นท่อลำเรียง แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 30-35 μm เนื่องจากอาจมีการพองตัวจากการปรับสภาพ ภายในท่อจะมีขนาดรูพรุนที่เล็กมากแต่ไม่ลึกหากเปรียบเทียบกับ B_{nonre}



$B_{initial}$

B_{nonre}

B_{nonlac}

B_x

(1) กำลังขยาย 700 เท่า (2) กำลังขยาย 3000 เท่า

รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ

4.2.4 **พื้นที่ผิว** (BET surface area) **และขนาดของรูพรุน** (average pore diameter)

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้วิธี BET พบว่า การปรับสภาพเส้นใยไผ่ทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนเฉลี่ยเกิดความเปลี่ยนแปลง โดยเส้นใยไผ่ B_x มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยสูงสุด โดยเส้นใย B_x มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากกว่าเส้นใย $B_{initial}$ ถึง 94.52% และ 54.65% ตามลำดับ

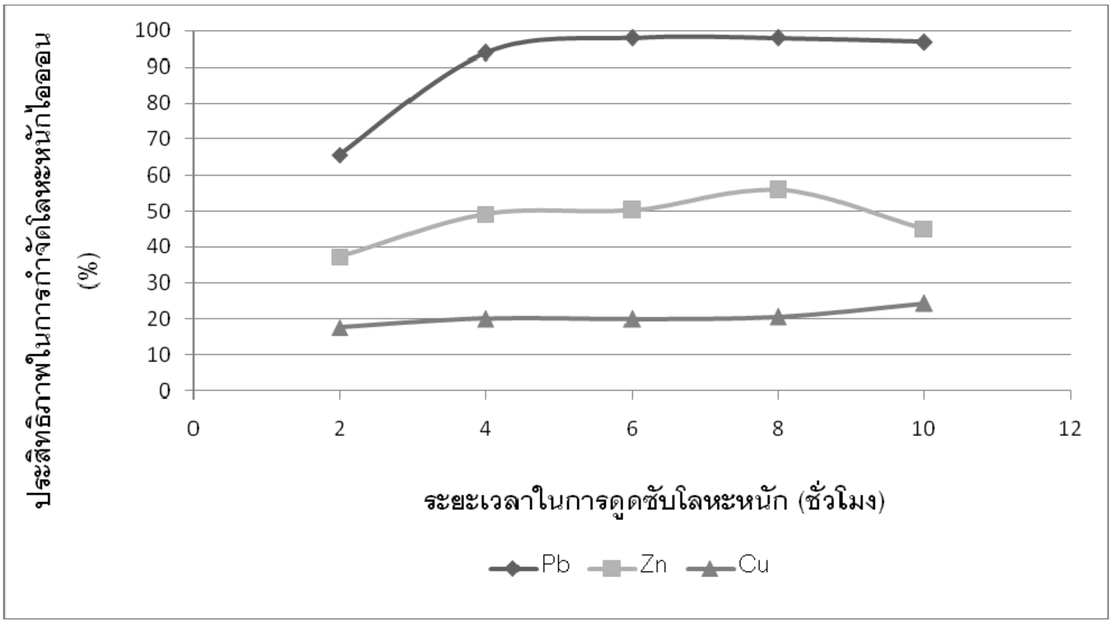
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ

ชนิดของเส้นใยไผ่	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)
$B_{initial}$	0.87	34.63
B_{nonlac}	11.72	41.65
B_x	15.89	76.37

โดยสรุป จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไผ่ B_x ที่มีหมู่คาร์บอกซิลมากกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และมีความสูงกว่ารวมทั้งเมื่อตรวจดูลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไผ่ด้วย SEM และวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยแล้วพบว่าเส้นใยไผ่ B_x มีขนาดของท่อลำเลียงภายในเส้นใยที่ใหญ่ขึ้น อาจเนื่องจากเส้นใยเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น และภายในท่อลำเลียงมีรูพรุนเล็กๆเกิดขึ้น พื้นที่ผิวของเส้นใยไผ่ B_x มีมากกว่า $B_{initial}$ ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพสามารถดูดซับโลหะตะกั่วที่มีประจุบวกได้มากกว่าเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพดังกล่าว

4.3 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

ผลของระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (B_x) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ที่แสดงในรูปที่ 4.12 อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาให้เส้นใยไผ่สัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว ใน 2 ชั่วโมงแรกจะมีผลทำให้เส้นใยไผ่ดูดซับตะกั่วได้สูงถึง 65.47% รองลงมาได้แก่ สังกะสี (37.25%) และทองแดง (17.7%) และเมื่อเพิ่มระยะเวลาไปอีก 2 ชั่วโมง พบว่าเส้นใยไผ่จะดูดซับตะกั่วได้สูงถึง 93.91% รองลงมาได้แก่ สังกะสี (49.11%) และทองแดง (20.19%) เห็นได้ว่าการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียสังเคราะห์อีก 2 ชั่วโมง จะทำให้อัตราการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 2 ชั่วโมงแรกคิดเป็น 43.44% ในขณะที่อัตราการดูดซับสังกะสีและทองแดงเพิ่มขึ้นเพียง 31.84% และ 13.62% ตามลำดับ และหลังจากนั้นถึงแม้จะเพิ่มระยะเวลาให้เส้นใยไผ่สัมผัสน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้นการดูดซับตะกั่ว สังกะสีและทองแดงจะค่อนข้างคงที่และเข้าสู่สมดุล ปรากฏการณ์นี้เห็นได้ชัดเจนสำหรับตะกั่วมากที่สุด อาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยไผ่ปรับสภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักแต่ละชนิด และจะเข้าใกล้สมดุลเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น (4 ชั่วโมง ขึ้นไป)



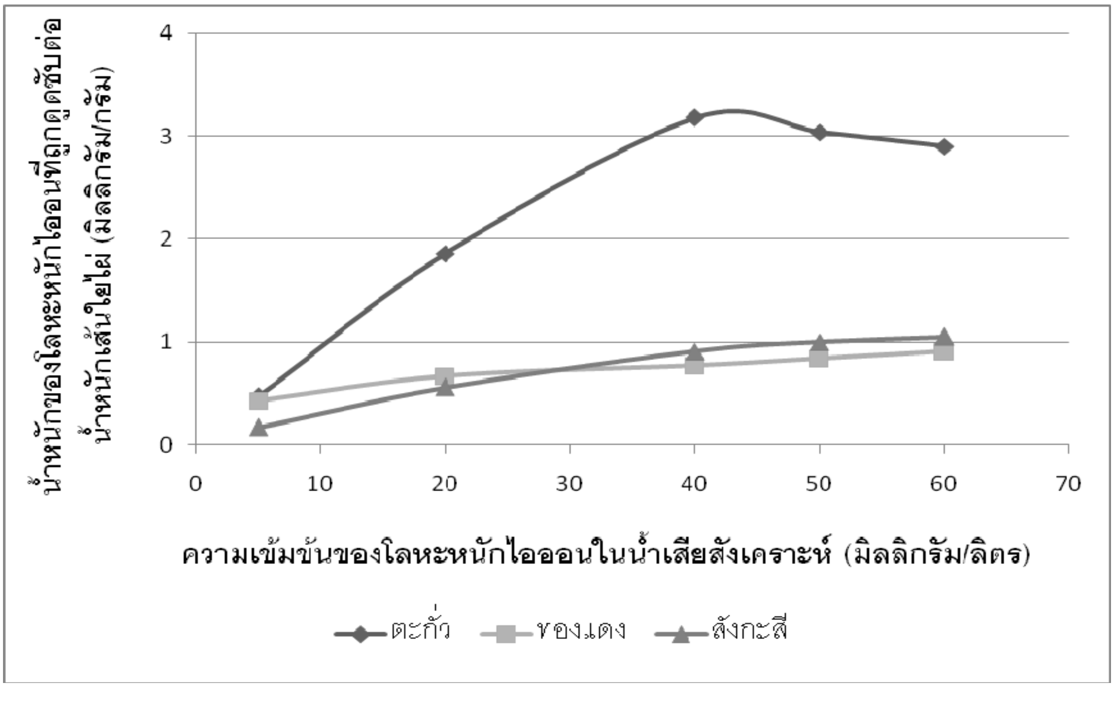
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ระยะเวลาในการดูดซับของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ B_x

4.4 ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ด้วยเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับตะกั่ว สังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ B_x โดยเริ่มแรกได้หาความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่จุดสมดุล ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณในสมการไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิก (สมการที่ 3.2) ซึ่งการทดสอบหาความเข้มข้นของโลหะหนักที่จุดสมดุลนั้นทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยไผ่ปรับสภาพ B_x ที่ความเข้มข้นต่างๆของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักไอออนที่มีต่อการกำจัดโลหะหนักไอออนของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ

ผลของความเข้มข้นของตะกั่ว สังกะสีและทองแดงไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อน้ำหนักของโลหะหนักไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยไผ่ B_x ซึ่งเป็นเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคส 5 มิลลิลิตรเพียงอย่างเดียวโดยไม่เติม รีซอร์ซินอล ที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 45 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.13



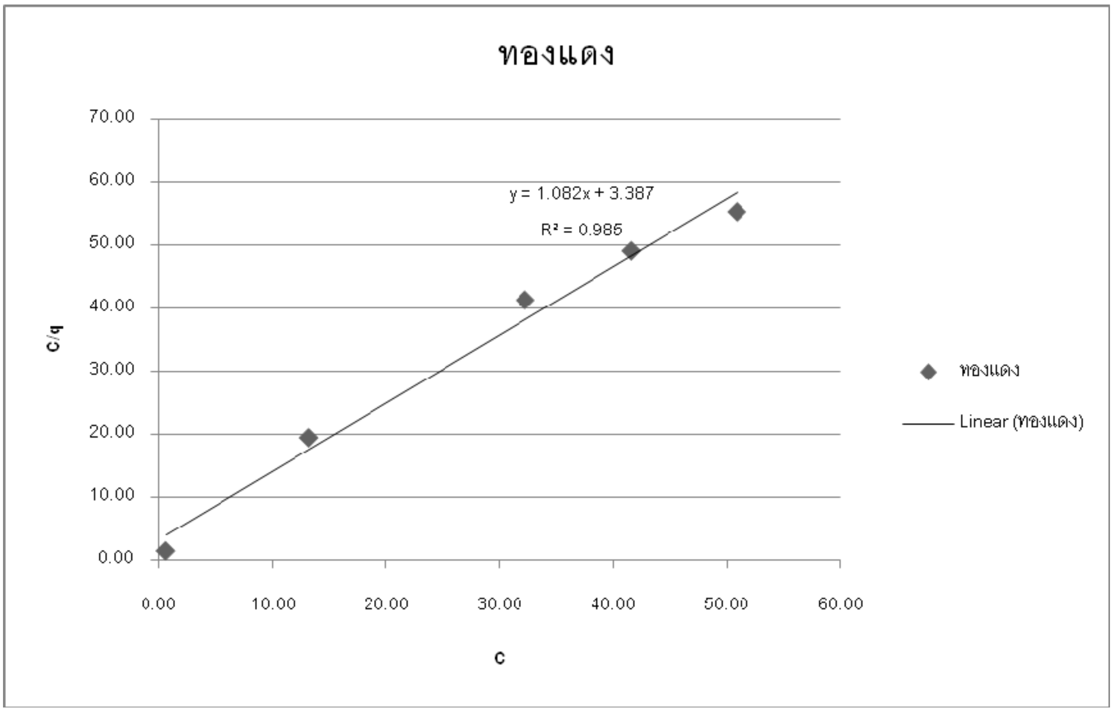
รูปที่ 4.13 แสดงน้ำหนักของโลหะหนักไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยไผ่ B_x ที่ความเข้มข้นต่างๆของโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.13 แสดงน้ำหนักของโลหะหนักไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยไผ่ B_x ที่ความเข้มข้นต่างๆของโลหะหนักไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นน้ำหนักของโลหะหนักไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ แต่มีข้อสังเกตว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโลหะหนักทองแดงและสังกะสีไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยไผ่ B_x จะใกล้เคียงกัน และจะค่อยๆลดลงจนคงที่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำหนักของโลหะหนักตะกั่วไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเส้นใยไผ่ B_x เพิ่มขึ้นอย่างมากจากความเข้มข้น 5 เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับสังกะสีและทองแดงโดยเพิ่มขึ้นถึง 74.73% และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของโลหะตะกั่วไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าประมาณ 43 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น

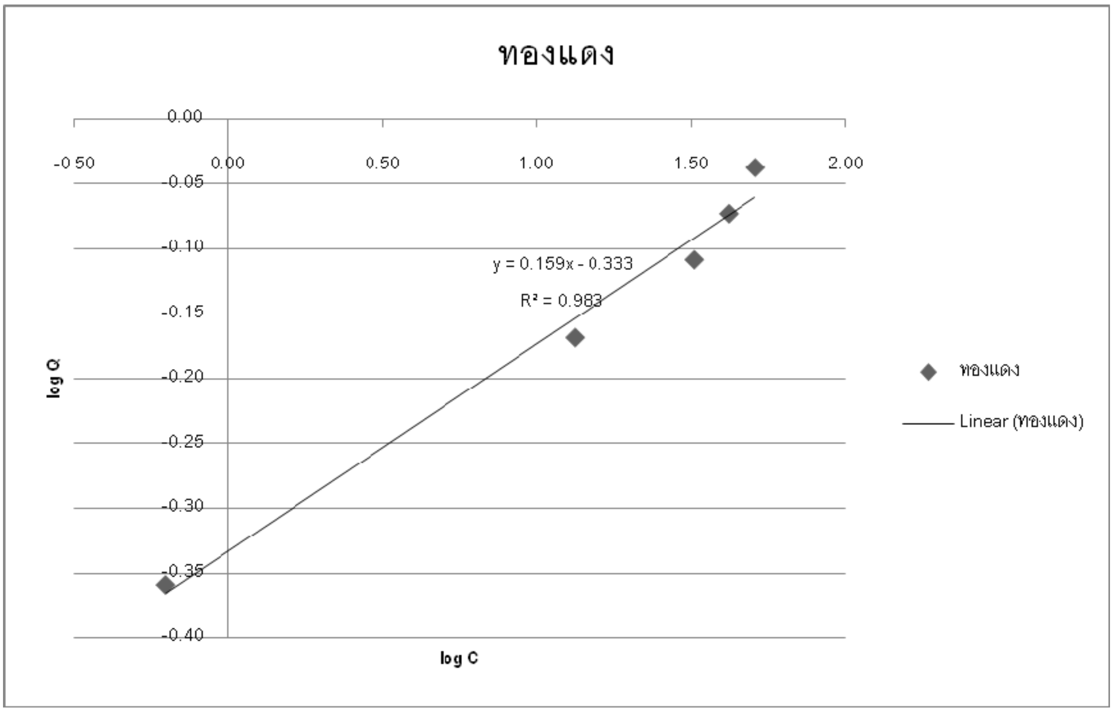
4.4.2 ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิกของการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ

หลังจากศึกษาผลความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่จุดสมดุล ที่ความเข้มข้นต่างๆของเส้นใยไผ่ที่ผ่านปรับสภาพ B_x แล้วนำไปคำนวณในสมการไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิก (สมการที่ 3.2) โดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษารูปแบบการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิกไอโซเทิร์ม แสดงในรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16

(ก)

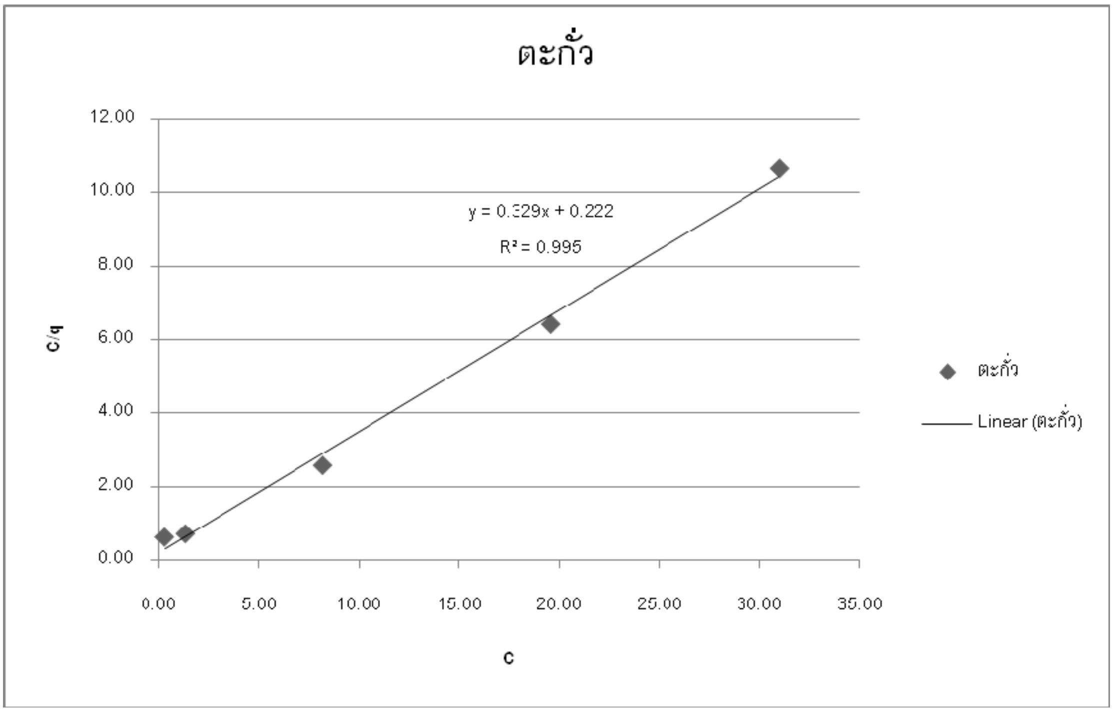


(ข)

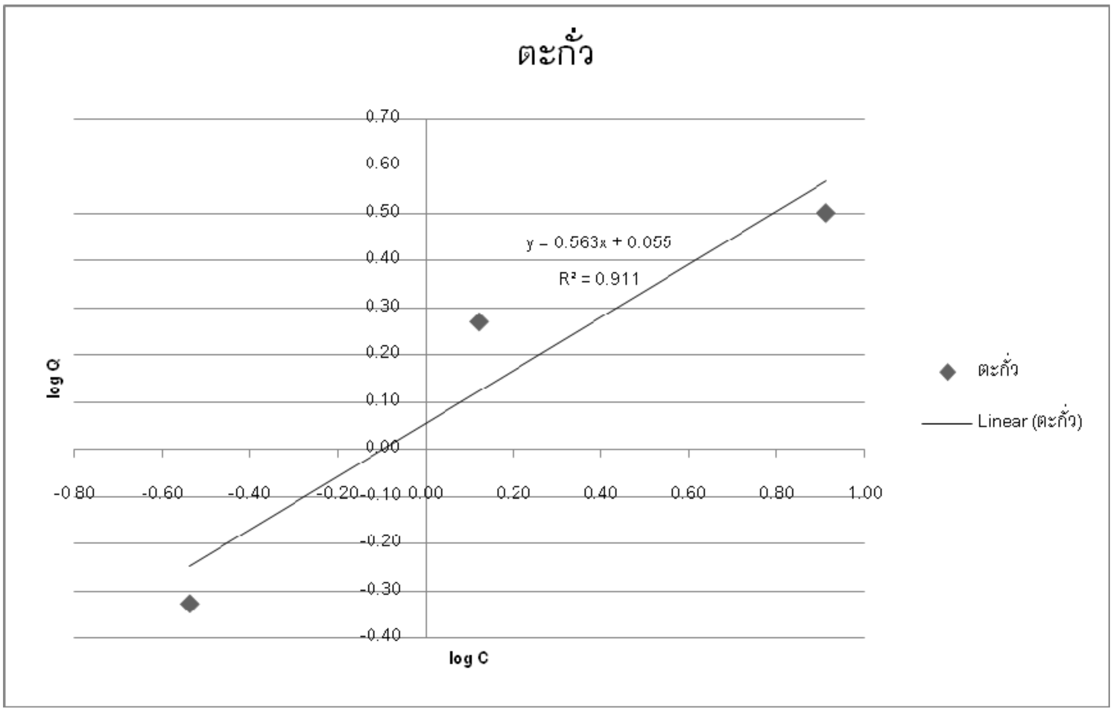


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะหนักทองแดงของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดลิก

(ก)

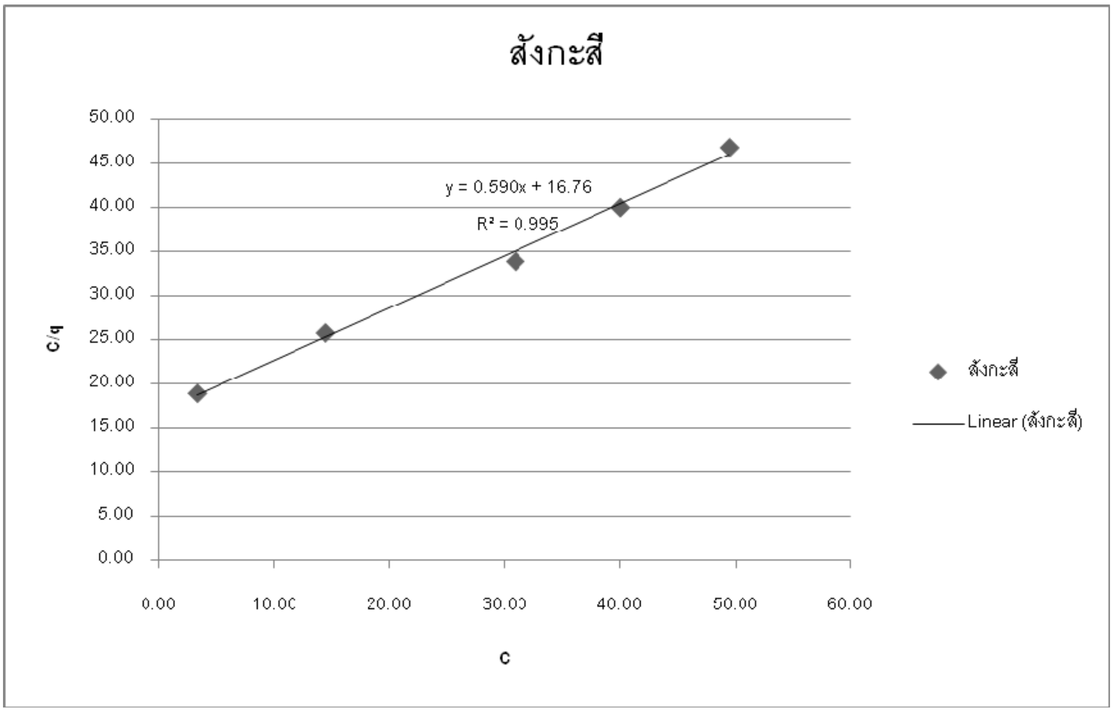


(ข)

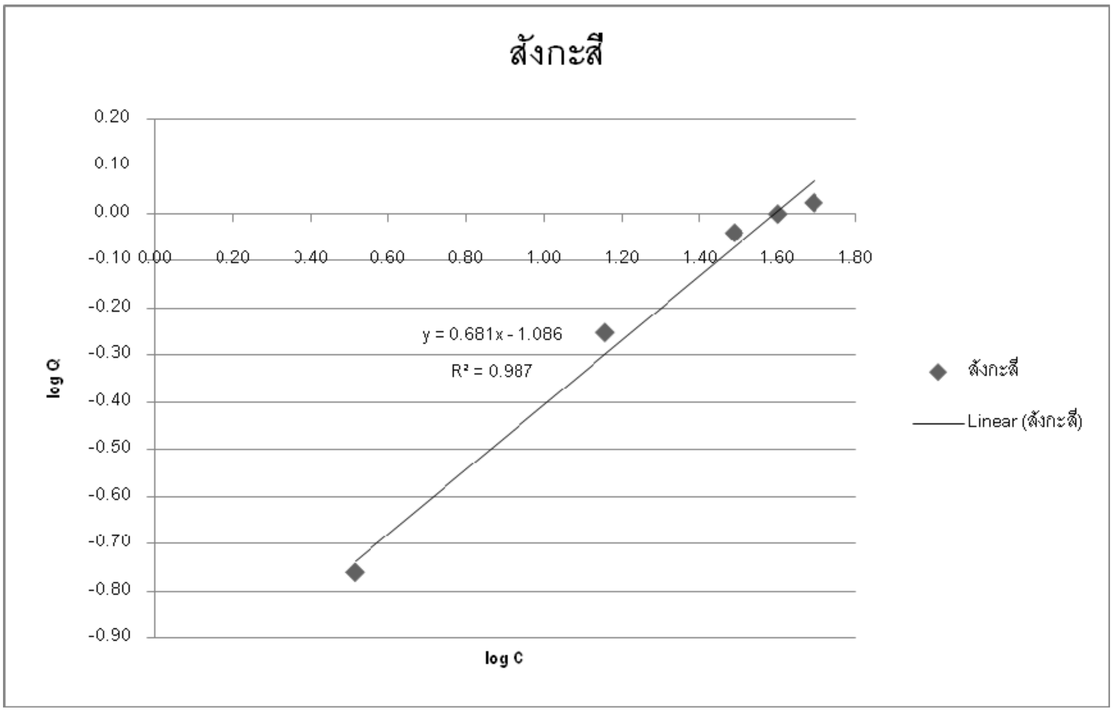


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดลิก

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโลหะหนักสังกะสีของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดลิก

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 สามารถนำมาคำนวณปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้สูงสุด (Q_{max}) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม ของตัวดูดซับ ของสมการฟรุนดลิก และค่า R^2 (correlaton coefficient) ของตัวดูดซับได้ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของการทดลองหาไอโซเทิร์มของเส้นใยไผ่

ชนิดโลหะหนัก	การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนัก		
	แลงเมียร์ $C_e/q_e=(1/bX_m)+(C_e/X_m)$		ฟรุนดลิก $\log q_e= \log K+ (1/n) \log C_e$
	R^2	Q_{max} (mg/g)	R^2
ทองแดง	0.985	0.92	0.983
ตะกั่ว	0.995	3.04	0.911
สังกะสี	0.995	1.70	0.987

ไอโซเทิร์มการดูดซับใช้ในการอธิบายกลไกลการดูดซับของโลหะหนักที่ภาวะสมดุล ซึ่งได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ กับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จากตารางด้านบนพิจารณาที่ค่า R^2 จะพบว่าค่า R^2 ของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิก มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการดูดซับของโลหะหนักตะกั่ว สังกะสีและทองแดง ในการทดลองนี้ จึงสอดคล้องทั้งการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และ การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) (ค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเบี่ยงเบนจากทฤษฎีมากน้อยเพียงใด ถ้าค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าเป็นไปตามทฤษฎีนั้น) อาจเนื่องมากจากเส้นใย B_x มีรูพรุนและพื้นที่ผิวที่ช่วยให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพระหว่างโมเลกุลของโลหะหนักกับตัวดูดซับ B_x อีกทั้งเส้นใย B_x ยังมีหมู่คาร์บอซิล ที่ช่วยเพิ่มการดูดซับโลหะหนักเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันในเส้นใยสามารถเกิดแรงดึงดูดทางเคมีกับโลหะหนักได้ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับได้สูงสุดพบว่า B_x สามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้สูงสุด 3.04 มิลลิกรัมต่อกรัม รองไปคือ สังกะสี 1.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และทองแดง 0.92 มิลลิกรัมต่อกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การปรับสภาพผิวของเส้นใยไผ่ และประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไอออนชนิดต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

1) เส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วไอออนได้สูง (29.47%) รองลงมาคือ สังกะสีไอออน (21%) และทองแดงไอออน (18.7%) ตามลำดับ

2) เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแลกเคสและรีซอร์ซินอล ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกัน โดยใช้สารละลายแลกเคส 5 มิลลิลิตร รีซอร์ซินอล 2 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 30, 50 และ 70 นาทีนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและสังกะสีไอออนสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ยกเว้นในการกำจัดทองแดงไอออนพบว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงไอออนใกล้เคียงกับเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ

3) เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณแลกเคส พบว่าเมื่อปริมาณแลกเคสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว สังกะสีและทองแดงไอออนลดลง

4) เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณรีซอร์ซินอล พบว่าเมื่อปริมาณรีซอร์ซินอลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว สังกะสีและทองแดงไอออนลดลง

5) เมื่อพิจารณาในด้านพลังงาน ความสะดวกในการปรับสภาพ การใช้สารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ จึงเลือกภาวะในการปรับสภาพเส้นใยไผ่เพื่อนำไปศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ คือการปรับสภาพเส้นใยไผ่ที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 45 ชั่วโมง ด้วยแลกเคส 5 มิลลิลิตรเพียงอย่างเดียว โดยไม่เติมรีซอร์ซินอล (B_x)

5.1.2 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพ

1) จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย FT-IR พบว่าเส้นใย B_x มีความเข้มของพีกที่ตำแหน่ง 1635 cm^{-1} มากกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่แลกเคสทำให้เส้นใยไผ่มีหมู่คาร์บอซิลเพิ่มมากขึ้น

2) เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ B_x มีความชื้น พื้นที่ผิว และขนาดของรูพรุนเฉลี่ยสูงกว่าเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

3) จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่าเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพมีขนาดของท่อลำเลียงภายในเส้นใยที่ใหญ่ขึ้น อาจเนื่องจากเส้นใยเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น และภายในท่อลำเลียงมีรูพรุนเล็กๆเกิดขึ้น

5.1.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยไผ่ปรับสภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักไอออนแต่ละชนิด และจะเข้าใกล้สมดุลเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น (4 ชั่วโมง ขึ้นไป)

5.1.4 การดูดซับโลหะหนักไอออนของเส้นใย B_x มีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิก โดยมีค่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักไอออนสูงที่สุดคือ กำจัดตะกั่ว 3.04 มิลลิกรัมต่อกรัม กำจัดสังกะสีได้ 1.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และกำจัดทองแดงได้ 0.92 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาน้ำเสียที่มีโลหะหนักไอออนชนิดต่างๆผสมกัน

5.2.2 ศึกษาการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมพิมพ์ของเส้นใยไผ่

5.2.3 วิเคราะห์ต้นทุนในการปรับสภาพเส้นใยไผ่ B_x ถึงความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในอุตสาหกรรมต่างๆ

5.2.4 ศึกษาการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักไอออนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เศรษฐกิจการพาณิชย์, กรม. เอกสารรายงานการค้าอุตสาหกรรมไม้ไผ่และผลิตภัณฑ์. กรุงเทพมหานคร: กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2536.

เกศสุชา คำพูล. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

ชัชฎาพร องอาจ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาสภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ประกฤต เลิศจรัสอร่ามดี. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เลื่อย ฟางข้าวและขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

ศุภรัตน์ ก๊กเครือ. การศึกษาเตรียมแผ่นสารดูดความชื้นเพื่อใช้ในการลดภาระความร้อนที่ผ่านหลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.

สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธ์. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาษาอังกฤษ

Argun, M. E., Dursun, S., Karatas, M., and Gürü, M. Activation of pine cone using Fenton oxidation for Cd(II) and Pb(II) Removal. Bioresource Technology (2008).

Ates. S, and et al. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia ten*) wood. Bioresources 4(3)(2009):1032-043.

Bradl, H. B. Heavy metals in the environment : Origin, Interaction and remediation. Germany : University of Applied Sciences Trier Neubrucke, 2005.

Chakar, F. S., Ragauskas, A. G. Laccase-lignin reactions. Sixth European workshop on lignocelluloses and pulp. France, 2000.

Faust, S. D., and Aly, O. M. Adsorption Process for Water Treatment. New York: Butterworth, 1987.

Jack, E. F. The heavy elements : Chemistry environmental impact and health effects. New Zealand : University of Canterbary, 1990.

Jain, S., and Kumar, R. Mechanical behavior of bamboo and bamboo pomposities. Materials science 27 (1992) : 4598-4604.

Kamthai, S. Preliminary study of anthraquinone in sweet bamboo (*Dendrocalamus asper Backer*) alkaline sulfite pulping. Chiang Mai journalscience (2007): 235-247.

Kenealy, W., and et al. Modification of lignocellulosic materials by laccase. Fall Technical Conference : Engineering, Pulping & PCE&I, 9. Atlanta,GA:Tappi Press,2003.

Lyle, D. S. Modeern textiles. United States of America : John Wiley & son, 1982.

Marièlle, B. Kinetics and Physico-Chemical Properties of White-Rot Fungal Laccases. Master's Thesis, Department of Microbiology and Biochemistry, Faculty of Natural and Agricultural Science, University of the Free State, 2001.

Noll, K. E., Gounaris, V., and Hou, W. S. Adsorption technology for air and water pollution control. United States:(n.p.), 1992.

O'Connell, D. W., Birkinshaw, C., and O'Dwyer, C. F. Heavy metal adsorbents prepared from modification of cellulose. Bioresource Technology (2008): 6709-6724.

Okieimen, F. E., Sogbaika, C. E., and Ebhoaye, J.K. Removal of cadmium and copper ions from aqueous solution with cellulose graft copolymers. Separation and Purification Technology (2005): 85-89.

Phani. K. A., and et al. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared spectroscopy. CSBE/SCGAB 2009, Prince Edword Island,2009.

Richard, I. M. Principle of adsorption and reaction on solid surface. New York : John Wiley & son, 1996.

Sakanen, K. V., and Ludwig, C. H. Lignin occurrence formation structure and reaction . New York: Wiley interscience, 1971.

Sawyer, C., McCarty, P., and Parkin, G. Chemistry for environmental engineering and science. 5thed. Singapore :McGrawhill, 2003.

Shin, E. W., and Rowell, R. M. Cadmium ion sorption onto lignocellulosic biosorbent modification by sulfonation : the origin of sorption capacity improvement Chemosphere (2005) : 1054-1061.

Susana, R. C., and Jose'Luis, T. H. Industrial and biotechnological applications of laccases : A review. Biotechnology advance 24(2006): 500-513.

Widsten, P., and Kandelbauer, A. Adhesion improvement of lignocellulosic products by enzymatic pre-treatment. Biotechnology Advances 26(2008): 379-386.

Witayakarn Suthee. Laccase in organic synthesis and its applications. Doctor's Thesis. School of Chemistry and Biochemistry,Georgia Institute of Technology, 2008.

Xiaobo L. Physical, chemical and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Master's Thesis, School of Renewable Natural Resources, Louisiana State University, 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะต่างๆ

เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิลิตรต่อลิตร)				ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	คงเหลือ ครั้งที่ 1	คงเหลือ ครั้งที่ 2	คงเหลือ	
B_{intial}	50	36.57	33.95	35.26	29.47
$B_{4\ °C,5\ hr}$	50	21.39	21.44	21.42	57.16
$B_{4\ °C,15\ hr}$	50	21.5	23.63	22.56	54.86
$B_{4\ °C,30\ hr}$	50	23.43	21.86	22.64	54.70
$B_{4\ °C,45\ hr}$	50	20.54	22.94	21.74	56.51
$B_{4\ °C,60\ hr}$	50	21.27	20.74	21.00	57.98
$B_{29\ °C,5\ hr}$	50	23.62	22.58	23.10	53.79
$B_{29\ °C,15\ hr}$	50	20.55	20.47	20.51	58.97
$B_{29\ °C,30\ hr}$	50	24.37	22.77	23.56	52.86
$B_{29\ °C,45\ hr}$	50	19.50	21.43	20.46	59.07
$B_{29\ °C,60\ hr}$	50	25.29	23.37	24.33	51.33
$B_{50°C,10min}$	50	26.08	23.99	25.03	49.92
$B_{50°C,30min}$	50	24.13	23.86	23.99	52.00
$B_{50°C,50min}$	50	25.63	24.6	25.11	49.76
$B_{50°C,70min}$	50	26.37	24.77	25.57	48.85
$B_{70°C,10min}$	50	21.91	21.53	21.72	56.55
$B_{70°C,30min}$	50	20.47	18.76	19.61	60.77
$B_{70°C,50min}$	50	19.69	19.30	19.49	61.00
$B_{70°C,70min}$	50	21.83	22.89	22.36	55.27
$B_{90°C,10min}$	50	22.35	24.74	23.52	52.95
$B_{90°C,30min}$	50	23.96	25.87	24.91	50.17
$B_{90°C,50min}$	50	23.9	23.26	23.58	52.83
$B_{90°C,70min}$	50	20.56	21.01	20.78	58.43

ตารางที่ ก.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะต่างๆ

เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิลิตรต่อลิตร)				ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	คงเหลือ ครั้งที่ 1	คงเหลือ ครั้งที่ 2	คงเหลือ	
B_{intial}	50	40.76	40.54	40.65	18.70
$B_{4\ °C,5\ hr}$	50	41.88	41.87	41.87	16.24
$B_{4\ °C,15\ hr}$	50	42.25	42.18	42.21	15.57
$B_{4\ °C,30\ hr}$	50	42.08	42.73	42.40	15.18
$B_{4\ °C,45\ hr}$	50	41.93	42.77	42.35	15.29
$B_{4\ °C,60\ hr}$	50	43.45	42.96	43.20	13.58
$B_{29\ °C,5\ hr}$	50	41.49	41.04	41.26	17.46
$B_{29\ °C,15\ hr}$	50	41.43	42.06	41.74	16.51
$B_{29\ °C,30\ hr}$	50	41.41	43.01	42.21	15.57
$B_{29\ °C,45\ hr}$	50	42.19	42.54	42.36	15.26
$B_{29\ °C,60\ hr}$	50	42.79	43.21	43.00	13.99
$B_{50°C,10min}$	50	41.99	43.86	42.92	14.14
$B_{50°C,30min}$	50	42.12	43.97	43.04	13.91
$B_{50°C,50min}$	50	41.93	43.19	42.56	14.87
$B_{50°C,70min}$	50	41.66	42.70	42.18	15.63
$B_{70°C,10min}$	50	41.09	41.89	41.48	17.02
$B_{70°C,30min}$	50	41.11	41.1	41.60	16.79
$B_{70°C,50min}$	50	41.96	42.78	42.36	15.26
$B_{70°C,70min}$	50	42.18	42.81	42.49	15.01
$B_{90°C,10min}$	50	42.58	43.23	42.90	14.18
$B_{90°C,30min}$	50	42.75	43.45	43.10	13.79
$B_{90°C,50min}$	50	42.75	43.40	43.07	13.84
$B_{90°C,70min}$	50	42.09	44.15	43.12	13.75

ตารางที่ ก.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะต่างๆ

เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิลิตรต่อลิตร)				ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	คงเหลือ ครั้งที่ 1	คงเหลือ ครั้งที่ 2	คงเหลือ	
B_{intial}	50	40.03	38.97	39.5	21.00
$B_{4\ °C,5\ hr}$	50	39.88	37.66	38.77	22.45
$B_{4\ °C,15\ hr}$	50	38.18	35.75	36.96	26.07
$B_{4\ °C,30\ hr}$	50	35.47	35.21	35.34	29.31
$B_{4\ °C,45\ hr}$	50	35.35	37.09	36.22	27.55
$B_{4\ °C,60\ hr}$	50	39.38	37.88	38.63	22.73
$B_{29\ °C,5\ hr}$	50	37.43	35.19	36.30	27.38
$B_{29\ °C,15\ hr}$	50	40.00	37.87	38.93	22.13
$B_{29\ °C,30\ hr}$	50	37.24	36.70	36.97	26.05
$B_{29\ °C,45\ hr}$	50	37.94	38.32	38.13	23.73
$B_{29\ °C,60\ hr}$	50	37.00	39.02	38.01	23.97
$B_{50°C,10min}$	50	37.03	37.00	37.02	25.96
$B_{50°C,30min}$	50	35.51	36.03	35.76	28.46
$B_{50°C,50min}$	50	37.01	39.01	38.01	23.96
$B_{50°C,70min}$	50	37.45	37.29	37.36	25.26
$B_{70°C,10min}$	50	35.85	37.23	36.54	26.91
$B_{70°C,30min}$	50	39.71	38.41	39.06	21.87
$B_{70°C,50min}$	50	36.22	37.57	36.89	26.20
$B_{70°C,70min}$	50	36.09	37.50	36.79	26.40
$B_{90°C,10min}$	50	36.65	38.52	37.58	24.83
$B_{90°C,30min}$	50	38.34	39.54	38.93	22.12
$B_{90°C,50min}$	50	35.32	37.60	36.46	27.07
$B_{90°C,70min}$	50	38.65	36.95	37.79	24.40

ตารางที่ ก.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการแปรเปลี่ยนปริมาณสารที่ใช้ในการปรับสภาพ

เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิลิตรต่อลิตร)				ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	คงเหลือครั้งที่ 1	คงเหลือครั้งที่ 2	คงเหลือ	
B_{intial}	50	36.59	33.94	35.26	29.47
B_{nonre}	50	18.13	16.15	17.13	65.72
$B_{re\ 2ml}$	50	22.48	20.01	21.24	57.50
$B_{re\ 4ml}$	50	24.90	23.70	24.30	51.39
$B_{re\ 6ml}$	50	22.61	21.22	21.91	56.17
B_{nonlac}	50	15.55	17.67	16.61	66.77
$B_{lac\ 10ml}$	50	23.32	23.20	23.26	53.47
$B_{lac\ 20ml}$	50	25.09	23.27	24.18	51.63
$B_{lac\ 30ml}$	50	25.51	25.49	25.49	49.00

ตารางที่ ก.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการแปรเปลี่ยนปริมาณสารที่ใช้ในการปรับสภาพ

เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิลิตรต่อลิตร)				ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	คงเหลือครั้งที่ 1	คงเหลือครั้งที่ 2	คงเหลือเฉลี่ย	
B_{intial}	50	28.03	27.71	27.87	44.25
B_{nonre}	50	41.63	41.72	41.67	16.65
$B_{re\ 2ml}$	50	41.80	42.04	41.92	16.15
$B_{re\ 4ml}$	50	42.13	42.42	42.27	15.44
$B_{re\ 6ml}$	50	40.91	41.80	41.35	17.28
B_{nonlac}	50	39.81	40.29	40.05	19.89
$B_{lac\ 10ml}$	50	42.33	40.31	41.31	17.36
$B_{lac\ 20ml}$	50	42.83	42.64	42.73	14.52
$B_{lac\ 30ml}$	50	42.61	42.04	42.32	15.34

ตารางที่ ก.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการแปรเปลี่ยนปริมาณสารที่ใช้ในการปรับสภาพ

เส้นใยไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิลิตรต่อลิตร)				ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	คงเหลือครั้งที่ 1	คงเหลือครั้งที่ 2	คงเหลือเฉลี่ย	
B_{intial}	50	40.03	38.97	39.5	21
B_{nonre}	50	32.18	31.09	31.63	36.72
$B_{re\ 2ml}$	50	33.44	32.74	33.09	33.81
$B_{re\ 4ml}$	50	34.6	34.49	34.54	30.91
$B_{re\ 6ml}$	50	32.52	33.52	33.02	33.95
B_{nonlac}	50	32.43	31.15	31.79	36.42
$B_{lac\ 10ml}$	50	36.92	38.25	37.58	24.83
$B_{lac\ 20ml}$	50	37.08	36.83	36.95	26.09
$B_{lac\ 30ml}$	50	39.26	36.93	38.09	23.80

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักตะกั่วของเส้นใยไผ่ B_x ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ

ความเข้มข้นโลหะตะกั่วหนักก่อนการทดสอบ (มิลลิลิตรต่อลิตร)	ความเข้มข้นโลหะหนักตะกั่วหลังการทดสอบ (มิลลิลิตรต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
5	0.224	0.357	0.29	94.19
20	1.31	1.33	1.32	93.37
40	5.93	10.33	8.17	79.55
50	19.09	20.02	19.55	60.89
60	29.62	32.31	30.96	48.39

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทองแดงของเส้นใยไผ่ B_x ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ

ความเข้มข้นโลหะหนักทองแดงก่อนการทดสอบ (มิลลิลิตรต่อลิตร)	ความเข้มข้นโลหะหนักทองแดงหลังการทดสอบ (มิลลิลิตรต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
5	0.36	0.18	0.62	87.45
20	14.59	14.21	13.21	33.91
40	30	31.76	32.21	19.46
50	37.87	42.13	41.54	16.91
60	51.41	47.47	50.82	15.29

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสังกะสีของเส้นใยไผ่ B_x ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ

ความเข้มข้นโลหะหนักสังกะสีก่อนการทดสอบ (มิลลิลิตรต่อลิตร)	ความเข้มข้นโลหะหนักสังกะสีหลังการทดสอบ (มิลลิลิตรต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
5	0.36	0.18	3.26	34.65
20	14.59	14.21	14.40	27.97
40	30	31.76	30.88	22.80
50	37.87	42.13	40.00	20.00
60	0.36	0.18	49.44	17.60

ตารางที่ ก.9 การวิเคราะห์หาไอโซเทิร์มในการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักในการกำจัดตะกั่ว

C_i (mg/l)	C1 (mg/l)	C2 (mg/l)	C_e=(C1+C2)/2 (mg/l)	$\Delta C=C_i-C_e$ (mg/l)	M=v/m (l/g)	q=ΔC*(M) (mg/g)	C/q (g/l)	log C	log q
5	0.22	0.36	0.29	4.71	0.1	0.47	0.01	-0.54	1.67
20	1.32	1.34	1.33	18.67	0.1	1.86	0.01	0.12	2.27
40	5.93	10.43	8.18	31.82	0.1	3.18	0.03	0.91	2.50
50	19.09	20.02	19.56	30.45	0.1	3.04	0.06	1.29	2.48
60	29.62	32.31	30.97	29.04	0.1	2.90	0.11	1.49	2.46

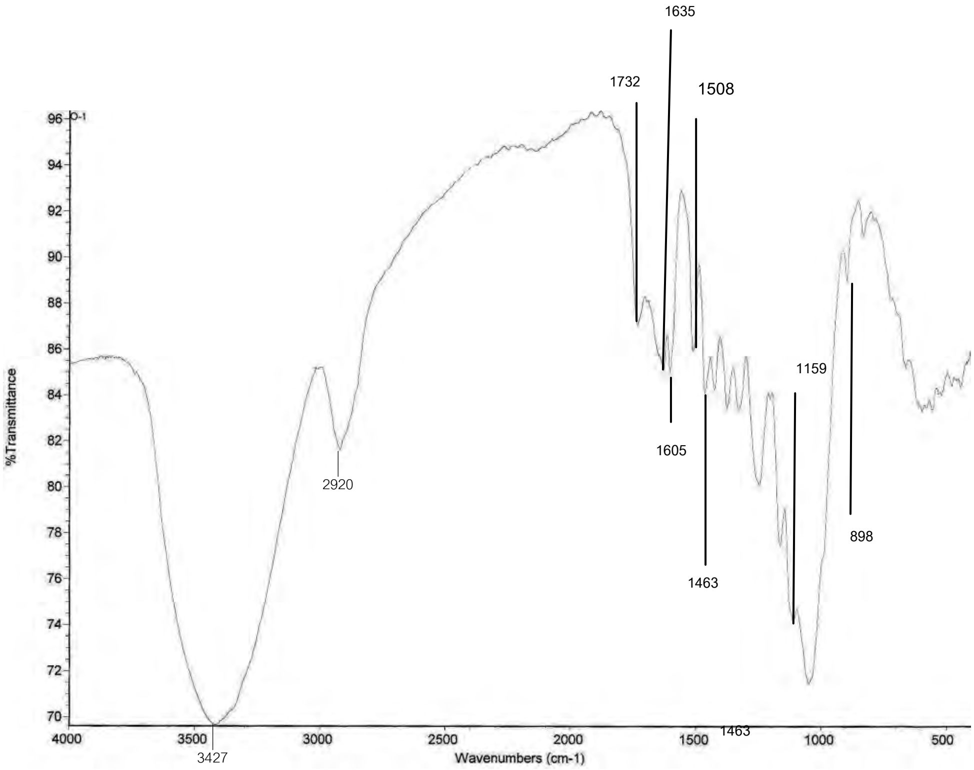
ตารางที่ ก.10 การวิเคราะห์หาไอโซเทิร์มในการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักในการกำจัดทองแดง

C_i (mg/l)	C1 (mg/l)	C2 (mg/l)	C_e=(C1+C2)/2 (mg/l)	$\Delta C=C_i-C_e$ (mg/l)	M=v/m (l/g)	q=ΔC*(M) (mg/g)	C/q (g/l)	log C	log q
5	0.61	0.65	0.63	4.37	0.1	0.44	1.44	-0.20	-0.36
20	13.44	13.00	13.22	6.78	0.1	0.68	19.49	1.12	-0.17
40	32.28	32.15	32.21	7.79	0.1	0.78	41.36	1.51	-0.11
50	40.09	43.00	41.55	8.46	0.1	0.85	49.14	1.62	-0.07
60	51.00	50.65	50.83	9.18	0.1	0.92	55.40	1.71	-0.04

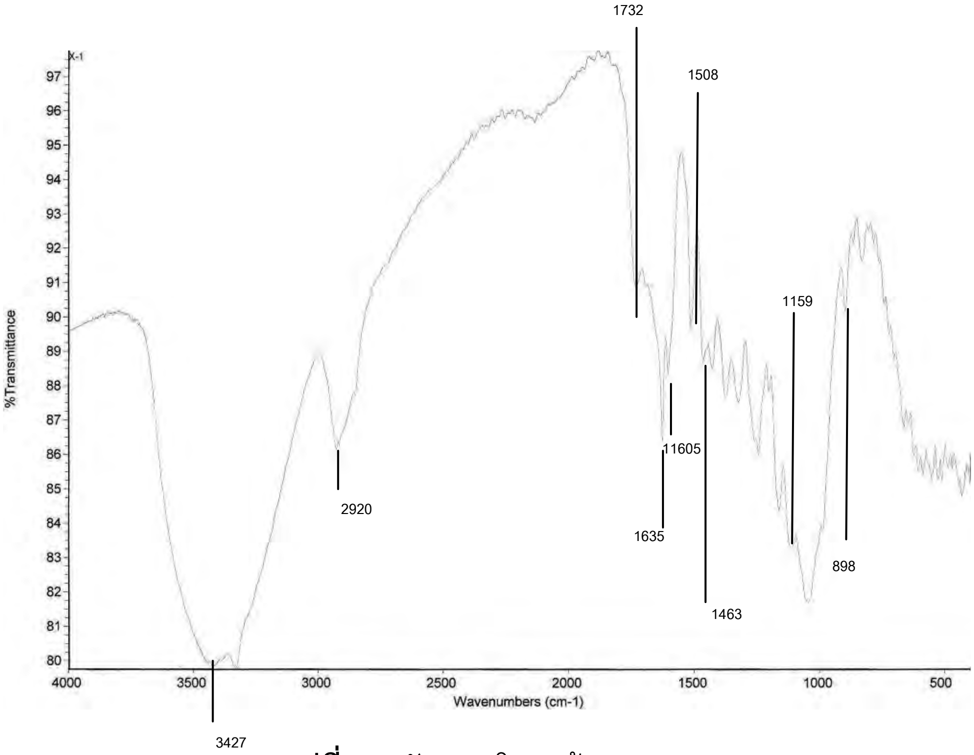
ตารางที่ ก.11 การวิเคราะห์หาไอโซเทิร์มในการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักในการกำจัดสังกะสี

C_i (mg/l)	C1 (mg/l)	C2 (mg/l)	C_e=(C1+C2)/2 (mg/l)	$\Delta C = C_i - C_e$ (mg/l)	M=v/m (l/g)	q=ΔC*(M) (mg/g)	C/q (g/l)	log C	log q
5	0.36	0.18	3.27	1.73	0.1	0.17	0.19	0.51	1.24
20	14.60	14.21	14.40	5.60	0.1	0.56	0.26	1.16	1.75
40	30.00	31.76	30.88	9.12	0.1	0.91	0.34	1.49	1.96
50	37.87	42.13	40.00	10.00	0.1	1.00	0.40	1.60	2.00
60	51.41	47.47	49.44	10.56	0.1	1.05	0.47	1.69	2.02

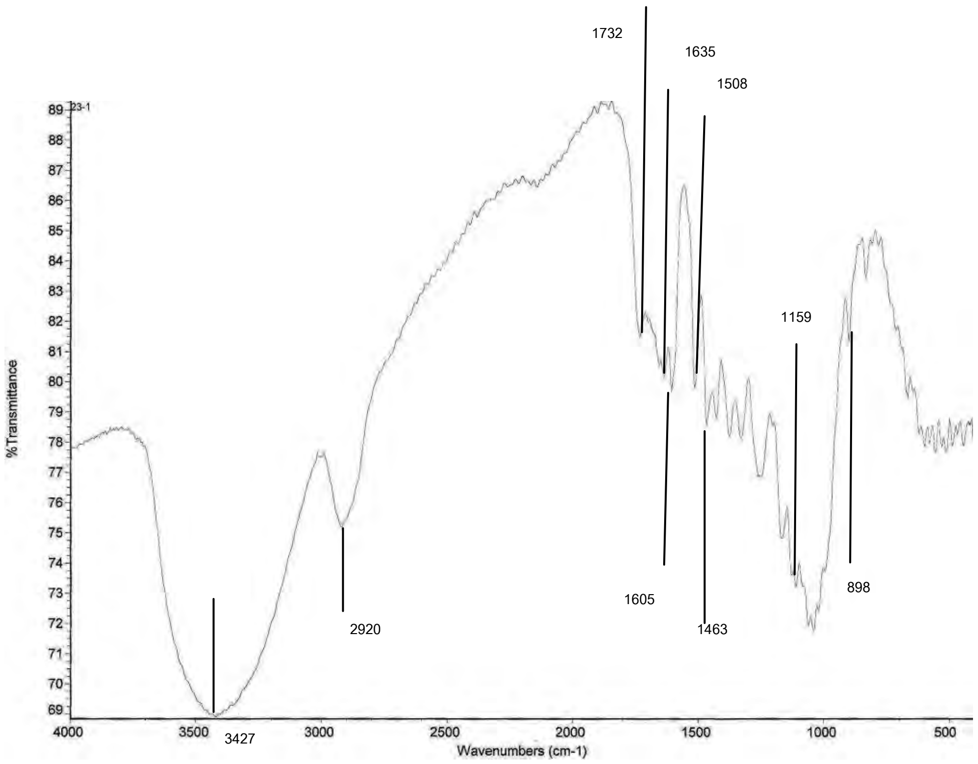
ภาคผนวก ข



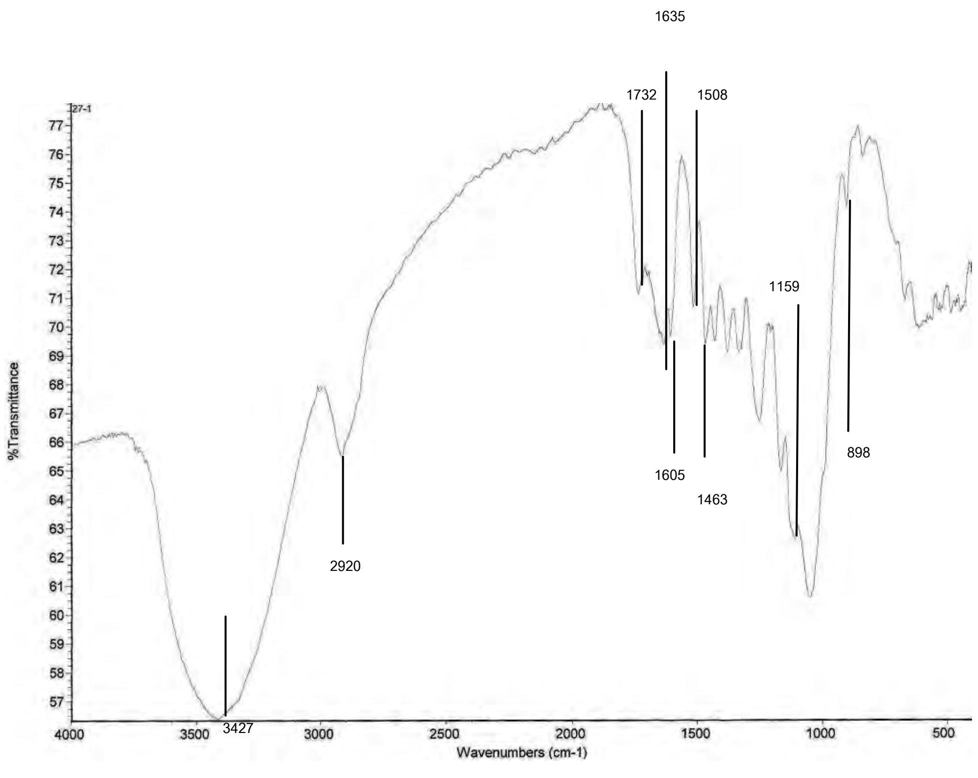
รูปที่ ข.1 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



รูปที่ ข.2 ลักษณะโครงสร้างของ B_x



รูปที่ ข.3 ลักษณะโครงสร้างของ B_{nonre}



รูปที่ ข.4 ลักษณะโครงสร้างของ B_{nonlac}

ตารางที่ ข.12 หมู่โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไผ่ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ

หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (cm^{-1})
O-H stretching	3427
C-H stretching	2920
C=O valance vibration of COOH group	1732,1635
C=C stretching aromatic ring for lignin	1508
C=C stretching vibration of benzenoid ring	1463
CH_2 bending for cellulose	1426
C-0-C antisymetric bridge (cellulose)	1159,895

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว จีรารัตน์ ตาคำ เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อปีการศึกษา 2548 และได้เข้าทำงานในบริษัท เอเชียไฟเบอร์ จำกัด มหาชน ตำแหน่ง ผู้ช่วยหัวหน้าห้องทดสอบ เป็นเวลา 1 ปี จึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคปลายของปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นของปีการศึกษา 2552 รวมระยะเวลาในการศึกษา 3 ปี