

การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยแผ่นคาร์บอนจากขี้เลื่อยและพลาสติกเหลือทิ้งจาก
กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

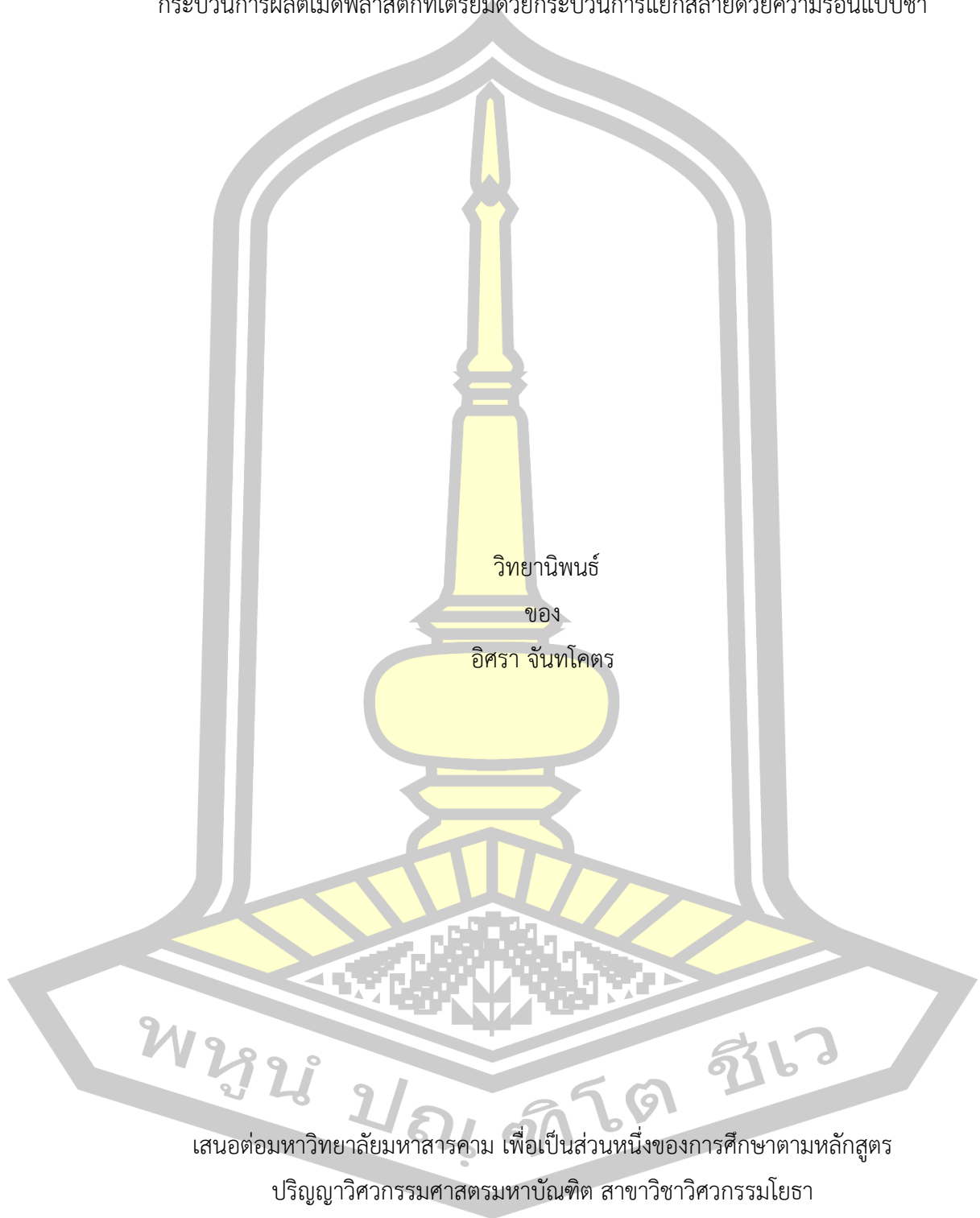
วิทยานิพนธ์
ของ
อิสรา จันทโคตร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การจัดทอองแแต่งในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์ผสมจากขี้เลื่อยและพลาสติกเหลือทิ้งจาก
กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า



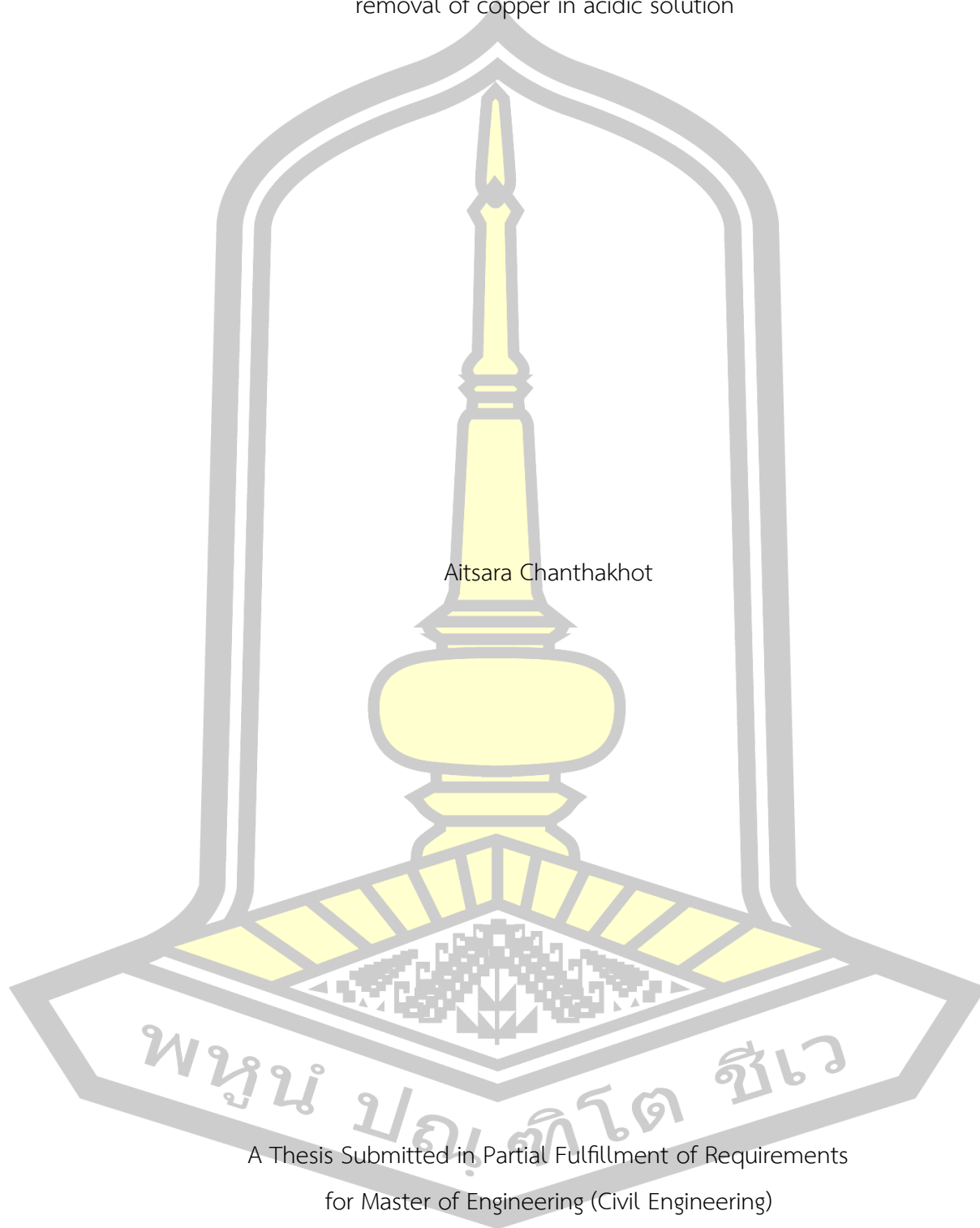
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Slow pyrolysis of waste sawdust and plastics for production of biochar and its use for
removal of copper in acidic solution

Aitsara Chanthakhot



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

June 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายอิสรา จันทโคตร แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. นพรัตน์ สุริยะไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. สุรัชย์ วงชาลี)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. เพ็ชร เพ็งชัย)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์ผสมจากขี้เลื่อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า		
ผู้วิจัย	อิสรา จันทโคตร		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัชย์ วงษ์ขารี		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไบโอชาร์ที่มีพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส และศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น SEM-EDX XRD BET และ FTIR และความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ในสารละลายกรด จากการศึกษาพบว่า ลักษณะทางกายภาพมีลักษณะของขี้เลื่อยพลาสติกเป็นสีดำ มีความเปราะ มันวาวเกิดจากน้ำส้มควันไม้ บ่งถึงการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับโลหะหนักได้ ถ่านชาร์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักสูงที่สุด พื้นที่ผิวจำเพาะที่ 500 องศาเซลเซียส มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดที่ 56.0534 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 0.6656 ตารางเมตรต่อกรัม ไอโซเทอมมีลักษณะการดูดซับประเภทที่สาม การสะท้อนของระนาบแสดงถึงลักษณะของรูปหกเหลี่ยม มีลักษณะคล้าย จากผลการทดลองพบว่าทั้งสามอุณหภูมิมีระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับคือ 60 นาที โดยถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความสามารถดูดซับสารละลายคอปเปอร์ได้มากที่สุดถึง 71 มิลลิกรัมต่อลิตร กลไกการดูดซับแสดงแบบจำลอง FL-PFO และแบบจำลองของ Redlich – Peterson ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพ สรุปได้ว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือก สำหรับการบำบัดน้ำและน้ำเสีย

คำสำคัญ : ขี้เลื่อย, ขยะพลาสติก, ถ่านไอโอชาร์, กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า, การดูดซับ

TITLE	Slow pyrolysis of waste sawdust and plastics for production of biochar and its use for removal of copper in acidic solution		
AUTHOR	Aitsara Chanthakhot		
ADVISORS	Assistant Professor Surachai Wongcharee , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

This study investigates the preparation of biochar using waste plastic from recycling processes as a catalyst through slow pyrolysis at temperatures of 300, 400, and 500 degrees Celsius. Physical and chemical properties were analyzed using SEM-EDX, XRD, BET, and FTIR techniques, as well as the adsorption capacity for copper in acidic solutions. The physical characteristics revealed that the plastic sawdust remained black, brittle, and shiny due to wood vinegar, indicating potential applications for heavy metal adsorption. Biochar prepared at 500 degrees Celsius had the highest carbon content, with a specific surface area of 0.6656 m²/g and the largest pore size of 56.0534 nanometers. The adsorption isotherms indicated Type III adsorption, with layer reflections suggesting a hexagonal structure similar to graphite. Experimental results showed that adsorption equilibrium was reached within 60 minutes for all three temperatures. Biochar prepared at 500 degrees Celsius exhibited the highest copper adsorption capacity at 71 mg/L. The adsorption mechanisms were described by the FL-PFO and Redlich-Peterson models, indicating physical adsorption. In conclusion, the prepared biochar offers a viable alternative for water and wastewater treatment, demonstrating effective copper adsorption and potential for sustainable waste reduction. Biochar prepared from waste plastic can significantly reduce waste while providing an efficient material for heavy metal adsorption. The study's findings suggest that using waste plastic in biochar production not only

enhances environmental sustainability by reducing plastic waste but also improves water quality through efficient copper adsorption. This dual benefit underscores the potential of biochar as a sustainable solution in environmental management.

Keyword : Sawdust, Plastic waste, Biochar, Slow pyrolysis, Adsorption



กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์เรื่องการจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์ผสมจากขี้เลื่อย และพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ วงษ์อารี อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้ความช่วยเหลือ ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ แนะนำแนวทางในการจัดทำปริญญานิพนธ์ ตรวจสอบปริญญานิพนธ์ ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำ ซึ่งเป็นผลให้ผู้จัดทำมีความสามารถในการทำและพัฒนาปริญญานิพนธ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ที่ใช้ในการทดลอง เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำชิ้นงานการค้นคว้าและวิจัย ตลอดจนการหารูปเล่มปริญญานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ พี่น้องและเพื่อน ๆ ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัย ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้จัดทำ ที่ได้ช่วยส่งเสริม สนับสนุนกระตุ้นเตือน คอยเอาใจใส่ดูแล ให้กำลังใจและทุนทรัพย์ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

อิศรา จันทโคตร

พนุน ปณฺ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	4
1.8 งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ไม้เลื่อย (Wood sawdust)	5
2.2 ขยะพลาสติก (Plastic Waste).....	7
2.3 ถ่านชาร์ (Charcoal).....	11

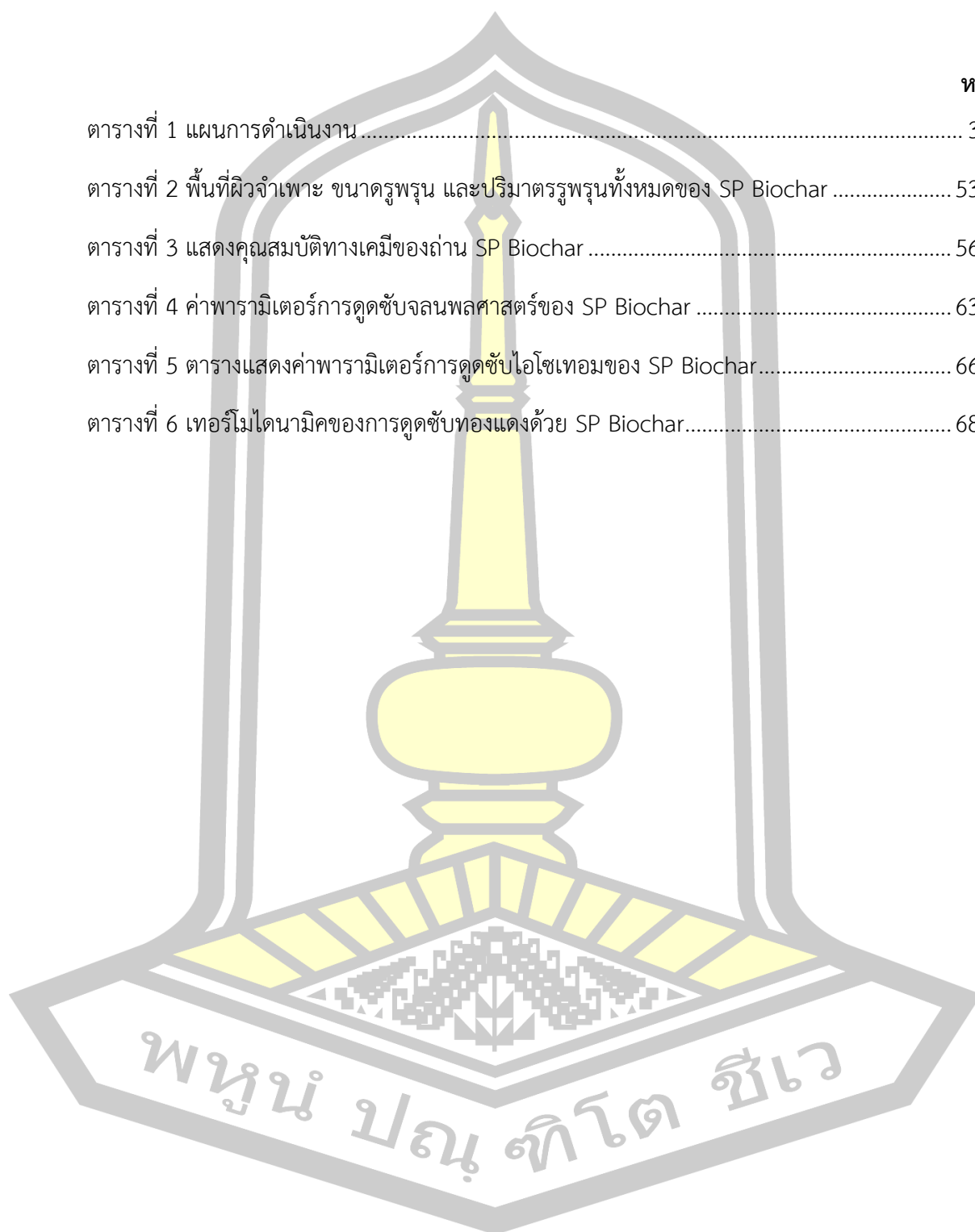
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	14
2.5 ทองแดง (Copper).....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3	31
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สถานที่ทำการวิจัย	31
3.2 การเตรียมถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis).....	31
3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar)	34
3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ	39
3.5 วิธีการทดลอง.....	39
3.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	41
บทที่ 4	43
ผลการดำเนินงาน.....	43
4.1 ลักษณะทางกายภาพของ Sawdust Plastic Biochar (SP Biochar) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า.....	43
4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	44
4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX)	47
4.4 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Brunauer Emmett Teller (BET).....	52
4.5 ลักษณะทางกายภาพของ X-Ray Diffraction (XRD).....	54
4.6 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี (CHNS)	55
4.7 ผลการศึกษาค่า point of zero charge (pH_{pzc}).....	56
4.8 ผลการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ	58
4.9 ผลการศึกษ ปริมาณตัวดูดซับ	59

4.10 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity)	60
4.11 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic adsorption)	61
4.12 ผลการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption Isotherm)	65
4.13 การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Thermodynamic adsorption)	68
บทที่ 5	67
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	67
5.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process)	67
5.2 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากขี้เลื่อยผสมขยะพลาสติก (PP)	70
5.3 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	77
ประวัติผู้เขียน	101



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของ SP Biochar	53
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของถ่าน SP Biochar	56
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับกลศาสตร์ของ SP Biochar	63
ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์การดูดซับไอโซเทอมของ SP Biochar.....	66
ตารางที่ 6 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับทองแดงด้วย SP Biochar.....	68



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ขี้เลื่อย	5
ภาพประกอบ 2 ไม้.....	6
ภาพประกอบ 3 Sankey Daigram อุตสาหกรรมไม้ของโรงงานอุตสาหกรรม.....	7
ภาพประกอบ 4 ขยะพลาสติก (Plastic Waste)	8
ภาพประกอบ 5 ขยะพลาสติกเหลือทิ้ง	9
ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการผลิตถ่านชาร์หรือไบโอชาร์	12
ภาพประกอบ 7 SP Biochar.....	13
ภาพประกอบ 8 ไอโซเทอมของการดูดซับ	17
ภาพประกอบ 9 โรงงานปล่อยน้ำเสียลงแม่น้ำ	27
ภาพประกอบ 10 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process).....	33
ภาพประกอบ 11 แก๊สหุงต้ม (cooking gas).....	33
ภาพประกอบ 12 ขี้เลื่อยและขยะพลาสติกที่เผาแล้ว.....	34
ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX).....	35
ภาพประกอบ 14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)	36
ภาพประกอบ 15 เครื่องฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	37
ภาพประกอบ 16 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET).....	38
ภาพประกอบ 17 ภาพถ่ายของวัตถุดิบและถ่านชาร์ที่เตรียมได้ (ก) ขยะพลาสติก (ข) ขี้เลื่อย (ค) SP Biochar และ (ง) SP Biochar แบบผง	44
ภาพประกอบ 18 FTIR ของวัสดุที่ใช้ดูดซับ (ก) ขี้เลื่อย และ (ข) พลาสติก PP.....	45

ภาพประกอบ 19 FTIR ของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C.....	47
ภาพประกอบ 20 SEM-EDX ของวัสดุที่ใช้ดูดซับ (ก) ขี้เลื่อย (ข) พลาสติก.....	48
ภาพประกอบ 21 SEM-EDXของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C, (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C.....	49
ภาพประกอบ 22 องค์ประกอบของธาตุ (ก) ขี้เลื่อย (ข) พลาสติก PP	50
ภาพประกอบ 23 องค์ประกอบของธาตุ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C.....	52
ภาพประกอบ 24 ไอโซเทอมของ SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการเตรียมแบบไพโรไลซิสแบบช้า.....	54
ภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึก SP Biochar ด้วยวิธี XRD	55
ภาพประกอบ 26 point of zero charge (pH_{pzc}) ของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C (ค) SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C.....	57
ภาพประกอบ 27 ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับของ SP Biochar	58
ภาพประกอบ 28 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงสังเคราะห์	59
ภาพประกอบ 29 ความสามารถในการดูดซับของ SP Biochar	61
ภาพประกอบ 30 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ SP Biochar (ก) แบบจำลอง Isotherm อุณหภูมิ 300 °C (ข) แบบจำลอง Isotherm อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) แบบจำลอง Isotherm อุณหภูมิ 500 °C.....	63
ภาพประกอบ 31 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของ SP Biochar (ก) แบบจำลอง Isotherm อุณหภูมิ 300 °C (ข) แบบจำลอง Isotherm อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) แบบจำลอง Isotherm อุณหภูมิ 500 °C.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยในปัจจุบันมีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมทำให้ประเทศไทยประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง มีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น 139,821 จากการสำรวจของกรมควบคุมมลพิษ ในปี พ.ศ. 2558 พบว่าปัญหามลพิษที่ได้รับการร้องเรียนมากที่สุดมีแหล่งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมถึงร้อยละ 54 รองลงมาคือ สถานประกอบการ ร้อยละ 20 ซึ่งปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตประจำวันของประชาชนมากที่สุดคือ มลพิษทางน้ำ เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการอุปโภคหรือบริโภค รวมทั้งการนำมาใช้ในด้านเกษตรกรรม โดยในปี พ.ศ. 2550-2559 พบแหล่งน้ำที่อยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม ร้อยละ 20 ซึ่งแหล่งน้ำที่มีคุณภาพเสื่อมสภาพลง ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง แม่น้ำท่าจีนตอนล่าง และลำตะคอง เนื่องจากแหล่งน้ำเหล่านี้เป็นช่วงที่แม่น้ำไหลผ่านพื้นที่ชุมชนเมืองที่มีประชากรอาศัยหนาแน่น และเป็นแหล่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมหลายแห่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ถ้าหากโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียหรือไม่มีการจัดการน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพแล้วมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยที่ไม่มีการบำบัดอย่างถูกวิธี หรือไม่ผ่านมาตรฐานที่ทางกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ย่อมทำให้แหล่งน้ำเกิดการเสื่อมคุณภาพหรือมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ ไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ซึ่งสารมลพิษทางน้ำที่เกิดการสะสมอย่างยาวนาน คือ โลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง แคดเมียม โครเมียม นิเกิล และแมงกานีส ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เป็นพิษต่อร่างกาย [1]

เทคนิคการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำที่ปนเปื้อนโลหะเหล่านี้ เช่น การตกตะกอน การแข็งตัว การดูดซับ [14] การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวิร์สออสโมซิส การกรองนาโนฟิลเตรชัน อิเล็กโทรลิซิส และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การเข้าถึงเทคนิคเหล่านี้ส่วนใหญ่มีข้อจำกัด เนื่องจากต้นทุนการดำเนินการสูงและการก่อตัวของกากตะกอน ในบรรดาเทคนิคที่กล่าวถึงข้างต้น การดูดซับเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดโลหะหนักเนื่องจากประหยัดต้นทุนและง่ายต่อการดำเนินการ เมื่อพิจารณาตัวดูดซับสำหรับโลหะหนัก เช่น ถ่านกัมมันต์ วัสดุเซลลูโลส ซีโอไลต์ อะลูมิเนียม วัสดุนาโน ถ่านชีวภาพ และถ่านกระดูก การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีราคาแพงขึ้นเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ความเป็นพิษ สารก่อมะเร็ง และค่าใช้จ่ายที่สูงมาก สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้นักวิจัยคิดค้นตัวดูดซับราคาถูกและเป็นธรรมชาติ เช่น ชีวมวล เมล็ดมะขาม แกลบทับทิม แกลบ และถั่วลย หรือจากพลาสติกเหลือทิ้ง

ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากชีวมวล หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง ชังและต้นข้าวโพด มูลสัตว์ กากตะกอนของเสีย เป็นต้น แม้กระทั่งมูลสัตว์นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุม อุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้

น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส” ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก ซึ่งมีสองวิธีหลักๆ คือการแยกสลายด้วยความร้อนอย่างช้า (Slow Pyrolysis) อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 300-600 องศาเซลเซียส แต่จะใช้เวลาเป็นชั่วโมง หากใช้อุณหภูมิเฉลี่ยในการเผาไหม้ประมาณ 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 20-50% ที่เหลือเป็นแก๊สที่จุดติดไฟได้และมีของเหลวบางส่วนที่ควบแน่นได้ การแยกสลายด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Fast Pyrolysis) อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ส่วนใหญ่ และที่เหลือได้แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) และถ่านชีวภาพ (Biochar) [2]

ขี้เลื่อย (Wood Sawdust) ถือว่าเป็นเศษวัสดุที่เหลือใช้จากโรงเลื่อยไม้หรือโรงเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งมีจำนวนมาก เช่นขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินณรงค์ ไม้กระถินเทพา ไม้กระถินยักษ์ สะเดาเทียม สนทะเล สนปญพิทท์ มะพร้าว มะขาม มะปรางบ้าน มะไฟบ้าน จามจุรี ไม้ตาล เป็นต้น ทางบริษัทฯ ได้ส่งเสริมให้มีผู้ผลิตขี้เลื่อยภายในประเทศทั้งรายย่อยและรายใหญ่เพิ่มมากขึ้น ขี้เลื่อยสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนและนำมาแปรรูปเป็นขี้เลื่อยอัดแท่งได้อีกด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้มากขึ้น ขี้เลื่อยจะถูกนำมาคัดขนาดให้ได้ขนาดขี้เลื่อย วัดปริมาณความชื้นในขี้เลื่อย เพื่อให้ได้ขี้เลื่อยที่มีคุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

พลาสติกถือว่าเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและสร้างขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดขยะพลาสติกในประเทศไทยมีขยะประมาณร้อยละ 12 ของปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่ในทางการจัดการนั้นยังไม่ดีพอจึงทำให้เกิดปัญหา เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่มีประโยชน์ เราจึงเล็งเห็นความสำคัญของเรื่องนี้ จึงนำมาไปโออาร์มาผสมกับพลาสติกกรีไซเคิล เพื่อนำมาดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ออกจากสารละลายที่เป็นน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของถ่านชาร์ผสมที่ทำจากขี้เลื่อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก โดยทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ผสมที่เตรียมได้ อีกทั้งศึกษา ค่า pH ความเข้มข้นเริ่มต้น อัตราปริมาณถ่านชาร์ที่ผสมที่เตรียมได้ และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงในสารละลายกรดสังเคราะห์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญในกระบวนการดูดซับ ดังนั้นความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบในกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่เหมาะสม รวมไปถึงต้นทุนการผลิตถ่านชาร์ผสมจากจากขี้เลื่อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก ที่มีผลต่อการออกแบบที่ประสบความสำเร็จในอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมถ่านชาร์ผสมด้วยขี้เลื่อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของถ่านชาร์ผสมที่เตรียมได้จากขี้เลื่อยผสมพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก

1.2.3 ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงสังเคราะห์เตรียมได้จากสารละลายในกรด

1.2.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ เทอโมไดนามิกและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับทองแดง ในสารละลายกรด

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากซีลี้อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า ที่อุณหภูมิ 300 400 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างคล้ายถ่านกัมมันต์

1.3.2 ถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากซีลี้อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก จากการบดหรือสับ สามารถนำมาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงในสารละลายกรดได้ เช่นทองแดงจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ซีลี้อยที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ พลาสติกของเสียจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิล ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง

1.4.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยใช้เครื่องมือขั้นสูงคือ SEM-EDX, XRD, BET, และ FTIR ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายสังเคราะห์

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.5.1 สามารถนำถ่านชาร์ผสมที่เตรียมได้จากซีลี้อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักได้

1.5.2 สามารถนำเศษซีลี้อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกมาแปรรูปเป็นถ่านชาร์เพื่อเพิ่มมูลค่าได้

1.5.3 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านชาร์ผสมของซีลี้อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก

1.5.4 สามารถนำถ่านชาร์ผสมของซีลี้อยและพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้ โดยเฉพาะโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์สังเคราะห์ทองแดงในสารละลายที่ค่า pH ไม่เกิน 2

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินการ
---------	-------------------

	ภาคเรียนที่2/2565					ภาคเรียนที่1/2566				
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	ม.ค.	เม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. นำเสนอหัวข้องานวิจัยต่ออาจารย์ที่ปรึกษา										
2. ศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับหัวข้องานวิจัย										
3. เริ่มปฏิบัติการทดลองและบันทึกผล										
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งทำการสรุปผล										
5. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

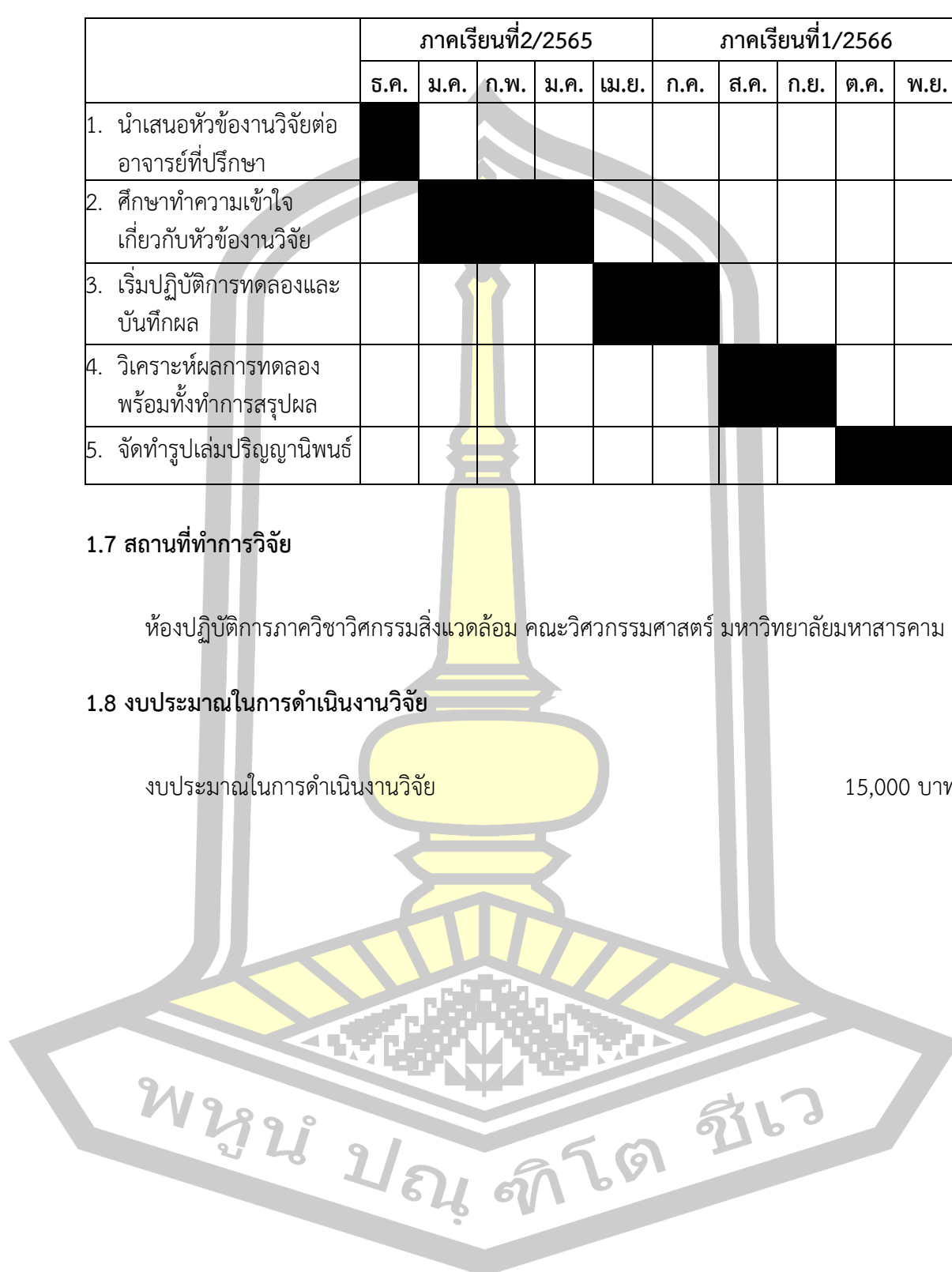
1.7 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.8 งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

15,000 บาท



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขี้เลื่อย (Wood sawdust)

2.1.1 ความหมายของขี้เลื่อย

ขี้เลื่อยถือว่าเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากโรงเลื่อยไม้หรือโรงเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งมีจำนวนมาก เช่น ขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินณรงค์ ไม้กระถินเทพา ไม้กระถินยักษ์ สะเดาเทียม สนทะเล สนปัทมพัทธ์ มะพร้าว มะขาม มะปรางบ้าน มะไฟบ้าน มาจอร์ไม้ตาล เป็นต้น ทางบริษัทฯ ได้ส่งเสริมให้ผู้ผลิตขี้เลื่อยภายในประเทศทั้งรายย่อยและรายใหญ่เพิ่มมากขึ้น ขี้เลื่อยสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนและนำมาแปรรูปเป็นขี้เลื่อยอัดแท่งได้อีก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำมัน ขี้เลื่อยจะถูกนำมาคัดขนาดให้ได้ขี้เลื่อย วัดปริมาณความชื้นในขี้เลื่อย เพื่อให้ได้ขี้เลื่อยที่มีคุณภาพ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม [4] ขี้เลื่อยสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ที่มีหมู่โพลีฟีนอลซึ่งสามารถจับกลุ่มกับโลหะหนักได้ด้วยกลไกต่างกัน อย่างอย่างเช่น ขี้เลื่อยจากต้นพอบลาร์และต้นเฟอร์ ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ดี ขี้เลื่อยจากต้นมะพร้าวที่ทำปฏิกิริยากับกับกรดซัลฟูริกดูดซับนิกเกิลและปรอทได้



ภาพประกอบ 1 ขี้เลื่อย

ที่มา : โรงงานไม้ [4]

Wood-Crete เป็นวัสดุใหม่ที่ทำจากขี้เลื่อยหรืออื่นๆ เศษไม้ เศษกระดาษ และปูนขาวโดยคำนึงถึง เพื่อให้ได้วัสดุที่ถูกลงและหาได้ในท้องถิ่นเพื่อตอบสนองความต้องการที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในตนเองและนำไปสู่การลดต้นทุนการก่อสร้างโดยรวมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน เศษไม้ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ Wood-Crete อาจเป็นขี้เลื่อยจากการเลื่อยไม้หรือเศษไม้อื่นๆ เนื่องจากไม้ถูกนำมาใช้ในปริมาณมากในหลายภาคส่วนและเป็น เป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวัน ปริมาณขี้

เลื้อยและอื่นๆ ไม้ที่หาได้ก็มีจำนวนมากเช่นกัน ชี้เลื้อยอาจหลวมได้ อนุภาคหรือเศษไม้ที่เป็นผลพลอยได้จากการเลื้อย ของไม้ให้เป็นขนาดมาตรฐานใช้งานได้ ขนาดของอนุภาคชี้เลื้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ที่ได้มาจากชี้เลื้อยและขนาดของฟันเลื้อยด้วย [5]



ภาพประกอบ 2 ไม้

ที่มา : โรงงานไม้ [6]

2.1.2 ปัญหาของชี้เลื้อย

ปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นแกลบหรือชี้เลื้อยต่างก็หายากและมีราคาแพงกันด้วยทั้งคู่ เพราะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการเพาะเห็ด วงการชีวมวล (Bio Mass) หรือ วงการอัดแกลบและชี้เลื้อยทำเฟอร์นิเจอร์ ส่งผลทำให้ภาคเกษตรขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิต ชนิดราคาย่อมเยาให้ลดน้อยถอยลงไปอย่างมาก การทำเกษตรในปัจจุบันจึงต้องมีต้นทุนสูงและผู้ผลิตยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและใส่ใจสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นมาด้วย [7]

2.1.3 แหล่งที่มาของชี้เลื้อย

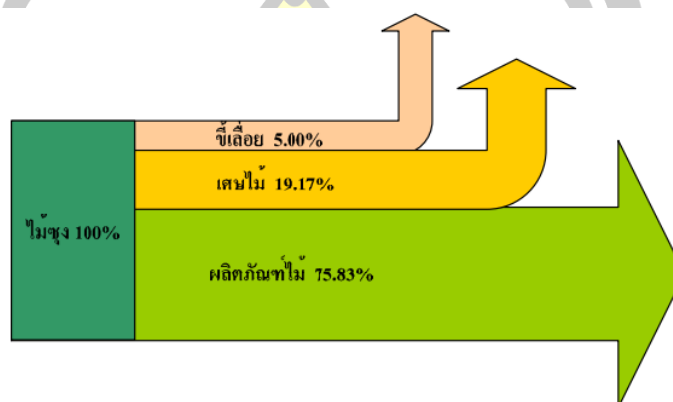
ชี้เลื้อยเป็นเศษเหลือของไม้จากโรงงานแปรรูปไม้ หรือโรงเลื่อยเป็นแหล่งกำเนิด ส่วนใหญ่จากการทำเฟอร์นิเจอร์ หรือการแปรรูปไม้ มีลักษณะความแตกต่างกันตามชนิดของไม้ หากมีการนำกลับมาใช้ในการทำปุ๋ยหรือวัสดุปลูก ควรจะปล่อยให้มีการสลายตัวก่อนการใช้งาน [8]

2.1.4 ประโยชน์ของชี้เลื้อย

ทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นไม้มาประดิษฐ์เป็นของเล่นของใช้ได้อย่างเหมาะสม และปัจจุบันไม้มีค่ามาก หายาก เพราะป่าไม้ถูกทำลายไปเกือบหมด จนต้องใช้วัสดุอื่นๆ มาทดแทนไม้และไม้ต่างๆ นั้นมีคุณค่ามาก เราจึงเห็นค่ากับทุกๆ ส่วน แม้กระทั่งชี้เลื้อย เป็นผลพลอยได้จากการเลื้อยไม้หรืองานรังสรรค์งานไม้ต่างๆ ชี้เลื้อยมีประโยชน์หลากหลายมากกว่าที่คิด ดังนั้นหลังเลื้อยไม้เสร็จให้นำกลับมาใช้ประโยชน์ดังนี้ [9] ใช้ทำความสะอาดคราบน้ำมัน คลุมแทนหญ้า ใช้ทำความสะอาดที่อยู่ของสัตว์เลี้ยง เป็นเชื้อไฟ เหมาะมากสำหรับปลูกต้นไม้ อดิโพรงไม้ และ ข่าวขี้พืช

2.1.5 โรงงานอุตสาหกรรมไม้

ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้คิดเป็น 75.83% ของปริมาณไม้ซุง เศษวัสดุที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต คือ เศษไม้ และขี้เลื่อย ปริมาณของเศษไม้ที่เกิดขึ้นคิดเป็น 19.17% และขี้เลื่อย 5% โดยในปัจจุบันเศษไม้ส่วนหนึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำในการร่อนไม้ และบางส่วนมีการขายให้แก่ชาวบ้านบริเวณใกล้เคียงเพื่อนำไปใช้ในการหุงต้ม ดังนั้นส่วนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เลย คือ ขี้เลื่อยมีปริมาณ 481,340 ตันต่อปีหรือเทียบเท่าพลังงานความร้อน 433, 206 GJ/ปี หรือ 10.25 ktoe



ภาพประกอบ 3 Sankey Daigram อุตสาหกรรมไม้ของโรงงานอุตสาหกรรม

ที่มา : อุตสาหกรรมไม้ของโรงงานอุตสาหกรรม [10]

2.2 ขยะพลาสติก (Plastic Waste)

ในทศวรรษของโลกรับบริโภคพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1950 และเติบโตขึ้นทุกปี จากคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานหลายอย่าง ทำให้มีการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันอย่างมาก และมนุษย์ก็สัมผัสกับพลาสติกด้วยวิธีการต่างๆ มีการประเมินว่า 2-5% ของพลาสติกทุกชนิดที่ผลิตขึ้นจะถูกทิ้งสู่ทะเลหรือฝังกลบ ทำให้สัตว์ทะเลกินพลาสติกเข้าไป และมนุษย์ก็กินสัตว์ทะเลเหล่านั้น โดยมีการตรวจพบไมโครพลาสติกปริมาณที่มีนัยสำคัญในหอย กุ้งมังกร และกุ้ง [11] ดังนั้นจึงเริ่มกระบวนการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกจากกระบวนการรีไซเคิล แต่ในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกนั้นมีเศษเหลือจึงนำมาสู่กระบวนการสับ บด ย่อย ที่พลาสติกไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพประกอบ 4 ขยะพลาสติก (Plastic Waste)

ที่มา : โรงงานขยะ [11]

สารพิษในพลาสติกแม้จะยังไม่ถูกพิจารณาให้เป็นปัญหาหลักของระบบสาธารณสุข แต่การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่ไม่ถูกต้องและไม่ปลอดภัย โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับอาหารและเครื่องดื่มอาจนำมาซึ่งการสะสมสารพิษและความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเรื้อรังต่างๆของผู้บริโภค สารประกอบบางชนิดที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรค ได้แก่ สารพาทาเลต (Phthalate) สาร Vinyl chloride สาร Styrene สาร Bisphenol A และสาร Formaldehyde [12]

2.2.1 ปัญหาของพลาสติก

ปัญหาขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นในปัจจุบันเกิดมาจากการบริโภค และการจัดการขยะพลาสติกภายหลังการบริโภค เนื่องจากที่ผ่านมาเกิดการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา (COVID-19) ทำให้รัฐบาลต้องมีมาตรการล็อกดาวน์ ให้ประชาชนอยู่แต่ที่บ้านเพื่อหยุดการแพร่ระบาดของเชื้อโรคมีการปิดห้างสรรพสินค้า สถานที่สาธารณะต่างๆ และห้ามการนั่งรับประทานอาหารในร้าน ทำให้ประชาชนต้องมีการซื้ออาหารมาบริโภคเอง ส่งผลให้พฤติกรรมการบริโภคของประชาชนต้องปรับเปลี่ยนตามสถานการณ์และสิ่งที่ตามมาคือ ปริมาณขยะที่มาจากบรรจุภัณฑ์ที่เป็นพลาสติกแบบใช้แล้วทิ้ง นอกจากนี้ประชาชนส่วนใหญ่ไม่ได้มีการคัดแยกขยะก่อนทิ้งทำให้ขยะพลาสติกถูกทิ้งปะปนกับขยะมูลฝอยอื่นๆ เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้ [13]

พหุ ม ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 5 ขยะพลาสติกเหลือทิ้ง

ที่มา : โรงงานขยะ [14]

2.2.2 การจัดการขยะพลาสติกในประเทศไทย

การจัดการขยะพลาสติกในประเทศไทยโดยกรมควบคุมมลพิษ (2563) มีการดำเนินการจัดการขยะพลาสติก 5 วิธีการด้วยกัน ดังนี้ [13]

1. การฝังกลบ (Land Fill) ส่วนใหญ่เป็นเศษขยะถุงพลาสติกที่ปนเปื้อน ไม่คุ้มกับต้นทุนในการจัดเก็บและการล้างทำความสะอาดของผู้เก็บของใช้แล้วมาขายเป็นอาชีพ ซึ่งได้แก่ถุงพลาสติก ที่ทำจากพลาสติกประเภท PP (Polypropylene) และ LDPE (Low Density Polyethylene) ตัวอย่างเช่น ถุงร้อน ถุงเย็น ที่ใช้บรรจุอาหารถุงหิ้วถุงซองพลาสติกขยะเหล่านี้ถูกนำไปทิ้งในสถานที่ฝังกลบ และงบประมาณในการจัดการขยะมูลฝอยรวมทั้งการใช้ถังพลาสติกเก็บรวบรวมขยะไปฝังกลบทำให้อยู่ยสลายได้ยากยิ่งขึ้น

2. การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิล (Recycle) และการใช้ซ้ำ (Reuse) เป็นทางเลือกที่ให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก แต่การรีไซเคิลผลิตภัณฑ์พลาสติกมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากส่วนใหญ่มีการปนเปื้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะอินทรีย์ทั้งนี้พลาสติกมีหลากหลายชนิด การนำกลับเข้ามาใช้ใหม่จะต้องแยกพลาสติกแต่ละชนิดออกจากกันก่อน สำหรับถุงพลาสติก ในปัจจุบันการนำกลับเข้าสู่โรงงานเพื่อรีไซเคิลเพียงบางส่วนเท่านั้น ส่งผลให้มีถุงพลาสติกที่ถูกทิ้ง เป็นขยะมูลฝอยในรูปแบบต่างๆ คงอยู่ในสภาพแวดล้อมเป็นจำนวนมาก

3. การเผาโดยปกติขยะพลาสติกที่ไม่ได้รับการคัดแยกจะถูกนำไปกำจัดรวมกับ ขยะมูลฝอยทั่วไป ประเทศไทยมีระบบเตาเผา 2 รูปแบบ คือเตาเผาผลิตพลังงาน (WTE: Waste to Energy)และเตาเผาทิ้ง โดยเตาเผาผลิตพลังงานมีเพียง 6 แห่ง เตาเผาทิ้งแบบถูกต้อง จำนวน 37แห่ง และเตาเผาทิ้งแบบไม่ถูกต้อง จำนวน 57แห่งรวมทั้งมีการเผากลางแจ้ง 93แห่ง (ข้อมูลปีพ.ศ. 2560 กรมควบคุมมลพิษ)การเผาแบบไม่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดสารพิษในชั้น บรรยากาศจากส่วนประกอบของพลาสติก อาจนำไปสู่การปนเปื้อนของแหล่งน้ำ แหล่งดิน รวมไปถึงในระบบห่วงโซ่อาหาร

สำหรับการเผาพลาสติกประเภทพีวีซี (Polyvinyl Chloride: PVC) จะส่งผลให้เกิดสาร Dioxin ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

4. การนำขยะพลาสติกมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) ซึ่งเป็นการจัดการที่ดีวิธีหนึ่ง เนื่องจากขยะพลาสติกเป็นขยะที่ให้ค่าความร้อนสูง (Heating Value) เหมาะใน การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง RDF โดยการปรับปรุงและแปลงสภาพขยะพลาสติกให้เป็นเชื้อเพลิงใน โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยมีการนำ RDF มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ รายใหญ่ อาทิ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง และบริษัทปูนซีเมนต์ทีพีโอ

5. น้ำมัน ขยะพลาสติกสามารถนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis) ได้ เนื่องจากขยะพลาสติกจะมีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ปัจจุบันประเทศไทย มีการศึกษาทดลองแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมัน ไพโรไลซิสในหลายพื้นที่แต่ยังไม่เกิดผลเป็น รูปธรรมที่ชัดเจน หากมีการนำ ขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นน้ำมันไพโรไลซิสได้จะช่วยแก้ไขปัญห ขยะพลาสติกได้ดีวิธีหนึ่ง

2.2.3 การจัดการขยะเพื่อลดปริมาณขยะพลาสติกของต่างประเทศ

1. ประเทศสวีเดน มีโครงการในการคัดแยกขยะและนำขยะกลับมาใช้เป็นพลังงาน นอกจากนี้ยังมีระบบมัดจำค่าขวดพลาสติกที่เก็บเงินค่าขวดพลาสติกจากผู้บริโภค หากผู้บริโภค ไม่นำขวดพลาสติกที่ใช้เสร็จแล้วไปคืน ณ จุดรับคืน ปัจจุบันยังให้ความสนใจกับการกำกับดูแล ถุงพลาสติก ด้วยการเริ่มระบบมัดจำถุงพลาสติกโดยมีราคาอยู่ที่ 0.5 โครนาสวีเดน ต่อใบ (ประมาณ 1.86 บาท) โดยเมื่อผู้บริโภคนำ ถุงพลาสติกมาคืนก็จะได้รับเงินคืน เพื่อป้องกันการทิ้งถุงพลาสติกไป อย่างเสียเปล่า [15]

2. ประเทศเยอรมนี มีการออกกฎหมายควบคุมขยะมูลฝอยในทุกภาคส่วนของประเทศไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการผลิตการจำหน่าย หรือการบริโภค รวมถึงให้คัดแยกขยะก่อนทิ้งทุกครั้ง นอกจากนี้ยังมีการเก็บภาษีรีไซเคิลจากร้านค้าทุกร้านที่มีถุงพลาสติกให้แก่ลูกค้าและยังมีระบบมัดจำค่าขวดพลาสติกที่กระตุ้นให้ผู้บริโภคส่งคืนขวดเพื่อรีไซเคิลต่อไป [15]

3. ประเทศญี่ปุ่น มีการออกกฎหมายสำหรับการจัดการขยะพลาสติก ส่งเสริมให้มีการใช้ซ้ำ และนำกลับ มาใช้ใหม่โดยยึดหลัก 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) ซึ่งมีการออกกฎหมายเฉพาะ ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น การคัดแยกขยะ การจัดเก็บภาษีถุงพลาสติก กฎหมายรีไซเคิลต่าง ๆ เป็นต้น จากการออกกฎหมายดังกล่าว ทำให้ประชากรในประเทศญี่ปุ่นลดการทิ้งขยะได้ถึง 40% [15]

4. ประเทศบังกลาเทศ มีการประกาศกฎหมายห้ามผลิตและแจกถุงพลาสติกแก่ผู้ซื้อ หากฝ่าฝืนจะถูกปรับครั้งละ 2,000 ดอนลาร์จากมาตรการดังกล่าวทำให้ปริมาณขยะจากถุงพลาสติก ลดลงอย่างมาก [15]

5. ประเทศอังกฤษ มีการเก็บค่าธรรมเนียมถุงพลาสติกจากผู้บริโภคในร้านค้าใบละ 5 เพนซ์ (ประมาณ 2.14 บาท) นอกจากนี้ยังมีแผนที่จะนำระบบมัดจำขวดพลาสติกมาใช้และเสนอให้มีการห้ามใช้หลอดดูดพลาสติก แท่งพลาสติกคนกาแฟ และก้านสำลีแคะหู เพื่อลดการใช้ถุงพลาสติก และลดงบประมาณค่ากำจัดขยะมูลฝอย [15]

2.3 ถ่านชาร์ (Charcoal)

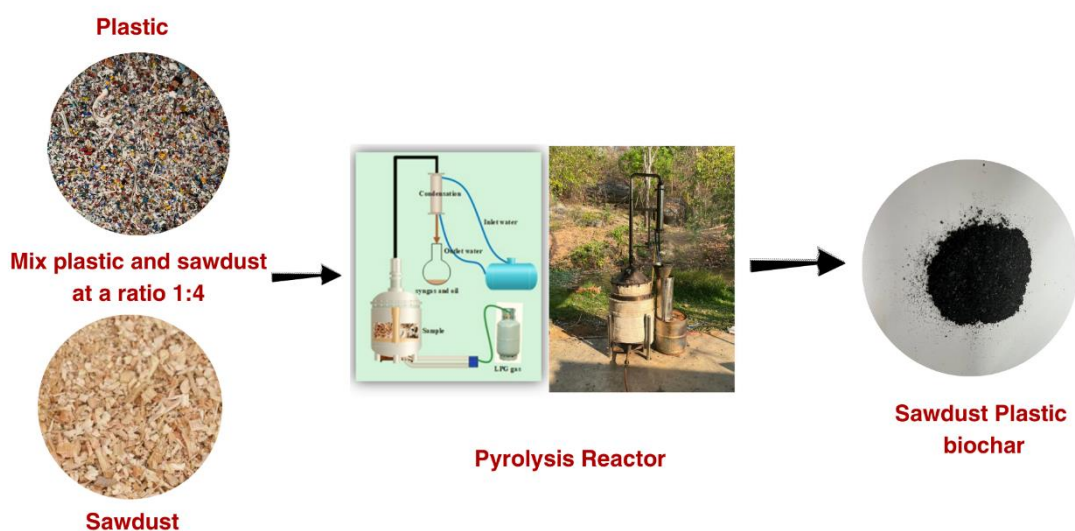
2.3.1 ความหมายของถ่านชาร์

ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากชีวมวล หรือ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า ฟาง ข้าว เหมืองแร่สำหรับผลิต พลังและต้นข้าวโพด มูลสัตว์ กากตะกอนของเสีย เป็นต้น แม้กระทั่งมูลสัตว์ นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุม อุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้ น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส” ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์ของถ่านชีวภาพมีหลายด้าน เช่น การปรับปรุงดิน และช่วยเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร รวมถึงลดระยะเวลาการปลูกได้อีกด้วย แล้วแต่ชนิดของพืชที่ปลูก มีงานวิจัยที่นำถ่านชีวภาพไปใช้กับ พืชทางการเกษตร ใช้เป็นวัสดุปลูกร่วมกับวัสดุอื่น เพื่อผลิตผลผลิตทางการเกษตร การลดการดูดซับ สารเคมีที่ใช้กำจัดวัชพืชและศัตรูพืช และโลหะหนักที่อยู่ในดินและน้ำ ของพืชที่ปลูก โดยถ่านชีวภาพ จะตรึงสารเคมีกลุ่มนี้ไว้ ทำให้ลดผลกระทบต่อพืชที่ปลูกจากสารเคมีและโลหะหนักที่ปนเปื้อน ใช้ดูดซับน้ำมันปิโตรเลียม ใช้เป็นตัวเร่ง ในปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและไบโอแก๊ส ใช้เป็น วัสดุเพื่อผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ถ่านชีวภาพถูกนำมาใช้มาเป็นเวลาหลาย พันปีมาแล้ว โดยชุมชนพื้นเมืองในแถบลุ่มน้ำอเมซอนของทวีปอเมริกาใต้ ได้ใช้เศษพืชจากพื้นที่ เพาะปลูกและมูลสัตว์ เผาให้กลายเป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งเรียกชื่อตามภาษาท้องถิ่นว่า Terra Preta มีความหมายว่าโลกดำ (black earth) หมายถึง สีของดินบริเวณนั้นมีสีคล้ำจนเกือบดำ เนื่องจากดิน ดังกล่าวมีปริมาณธาตุอาหารหรืออินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่า พื้นที่ที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ปัจจุบันพบว่าพื้นที่ ที่เคยมีการใช้ถ่านชีวภาพในพื้นที่เกษตรกรรม ในหลายพื้นที่ของอเมริกา ยุโรป และ เอเชีย เช่น เอกวาดอร์และเปรูในอเมริกาใต้ เบนิน และไลบีเรียในแอฟริกาตะวันตกและทุ่งหญ้าสะวันนาใน แอฟริกาใต้ จีนและออสเตรเลีย เป็นต้น อีกทั้งมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับการผลิตและการ ประยุกต์ใช้งานถ่านชีวภาพ

2.3.2 การผลิตถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar)

ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิต จาก ชีวมวล (Biomass, วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น เหมืองแร่สำหรับผลิต พลังข้าว พังข้าวโพด กิ่งไม้ เป็นต้น) ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้น้อยมาก (ไพโรไลซิส, Pyrolysis) ซึ่งมีสองวิธีหลักๆ คือการแยกสลายอย่างรวดเร็ว และอย่างช้า การผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลาย อย่างช้าที่อุณหภูมิเฉลี่ย 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 50% แต่จะใช้ เวลาเป็นชั่วโมง ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิเฉลี่ย 700 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลา เป็น วินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) 60% แก๊สสังเคราะห์ (syngas) 20% และถ่าน ชีวภาพ 20% [16]

ในการผสมถ่านที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือใช้ลงไปในเตา ท่านยังได้มีบทบาท ในการช่วยลดภาวะโลกร้อน เนื่องจากถ่านชีวภาพเป็นคาร์บอน มีความทนทานต่อการ ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และสูญหายไปจากเตาได้ยาก ดังนั้นจึงสะสมอยู่ในเตาเป็นการ เพิ่มคาร์บอนให้แก่ดินแทนที่จะเผากลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศอันเป็น ตัวการหนึ่งของภาวะโลกร้อน ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์นั้นได้รับการพิจารณาจากนักวิทยาศาสตร์ ทั้งหลายให้เป็นเสมือนทองคำของชาวเกษตรกรรม ด้วยคุณสมบัติที่มีสารคาร์บอนสูง และมีรูพรุนตามธรรมชาติช่วยให้ไบโอชาร์สามารถอุ้มน้ำและธาตุต่างๆรวมถึงการป้องกัน จุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มการย่อยสลายและแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เอาไว้ในดิน ในขณะที่ไบโอชาร์ หน้าที่เสมือนกับอ่างคาร์บอนธรรมชาติ ไบโอชาร์ช่วยในการทำความสะอาดอากาศได้ 2 ทาง คือ การป้องกันการปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ของสารชีวภาพขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ช่วยให้พืชดูดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ อย่างช้าๆในขณะที่พืชสังเคราะห์แสง [16]



ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการผลิตถ่านชาร์หรือไบโอชาร์

ถ่านชาร์ (Chacoal) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเนื่องจากสามารถกักเก็บออกซิเจนและเติมธาตุอาหารให้กับดินได้เวลาต่อมาได้มีการศึกษาเพิ่มมากขึ้นและพบว่าไบโอชาร์เป็นวัสดุเฉพาะทาง (Functional material) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายลักษณะ สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางสิ่งแวดล้อมได้มีการนำไบโอชาร์มาใช้ในการ บำบัดมลสาร (Pollutant) ในดินและน้ำ เช่น ยาปฏิชีวนะ ซัลฟาเมทอกซาโซล (Sulfamethoxazole) สารทำลายไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) ยากำจัดศัตรูพืชคาร์โบฟูแรน (Carbofuran) โดยการใช้งานมีทั้งในรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment system) และ การปนเปื้อนพื้นที่ปนเปื้อน (Site remediation) งานวิจัยในอดีตชี้ให้เห็นความเป็นไปในการใช้ไบโอชาร์ เพื่อเป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถใช้ร่วมกับวิธีการบำบัดทางชีวภาพ

(Biodegradation) โดยอาศัยเทคนิคการตรึงเซลล์จุลินทรีย์บนไบโอซาร์ (Cell immobilization) เทคนิคนี้รวมดังกล่าวนี้นอกจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนสูงแล้วยังมีต้นทุนในการบำบัดน้อย สามารถทำได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [17]



ภาพประกอบ 7 SP Biochar

2.3.3 ไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่ เปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงที่มี ค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และ ก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดย สัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส ขึ้นอยู่กับปัจจัย หลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบ ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) [18]

- 1) กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำ ปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที) ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลว 30-50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25-35 เปอร์เซ็นต์
- 2) กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการ ให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) เส้นผ่าน ศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของ ไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบ ประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลว เรียกว่า น้ำมัน

ชีวภาพ ประมาณ 60-75 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง 15-25 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไม่กลั่นตัว 10-15 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนประกอบ ของน้ำในน้ำมันชีวภาพ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ที่มีในชีวมวลเริ่มต้น

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า(interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ(adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) [19] การดูดซับเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเลือกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนักในดินหรือตะกอนดินในแหล่งน้ำต่างๆ เช่น ทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ ส่วนกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำและอากาศด้วยถ่านกัมมันต์

2.4.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว- ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี

2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

1. การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย
2. การดูดซับทางเคมี การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

2.4.3 สมดุลการดูดซับ

เมื่อการดูดซับเกิดขึ้น วัฏภาคดูดซับ (Absorbed phase) เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับดังสารถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (Fluid phase) ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สหรือ ของเหลวที่เคลื่อนไหวได้อย่างอิสระจะถ่ายโอนไปยังวัฏภาคดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ เมื่ออัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคดูดซับไปยังวัฏภาคของไหล นั่นคืออัตราการดูดซับสุทธิเป็นศูนย์ ดังนั้นการดูดซับสารถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) สมดุลดูดซับ (Adsorption equilibrium) จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการ ออกแบบกระบวนการแยกสารทางอุตสาหกรรมได้ [20]

สมดุลดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับชนิดของสารถูกดูดซับความเข้มข้นหรือ ความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิ สมดุลดูดซับจำเพาะของสารถูกดูดซับชนิดใดๆ ด้วยตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่กำหนดไว้ จึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ (q_i) กับ ความเข้มข้นสมดุล (C_i) หรือความดันสมดุล (P_i) และอุณหภูมิสมดุล (T_i) แบบจำลองการดูดซับ จึงจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ดังนี้ [21]

1. แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความดันสมดุลของแก๊สหรือไอของสารถูกดูดซับ หรือความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลว ณ อุณหภูมิที่กำหนด

2. แบบจำลองสมดุลดูดซับความดันคงที่ (Adsorption isobar) หรือความเข้มข้นคงที่ เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับอุณหภูมิสมดุล
3. แบบจำลองสมดุลดูดซับความสามารถในการดูดซับคงที่ (Adsorption isostere) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสมดุลของแก๊สหรือไอของสารถูกดูดซับ หรือความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลวกับอุณหภูมิสมดุล แม้ว่าการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน แต่ความร้อนของการดูดซับทั่วไปมักมีค่าน้อยกว่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีมาก และสามารถระบายออกจากระบบดูดซับได้โดยง่าย อุณหภูมิของระบบการดูดซับจึงเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้นจึงนิยมวัดแบบจำลองสมดุลดูดซับ อุณหภูมิคงที่ หรือเรียกว่าไอโซเทอมการดูดซับ

2.4.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดัน หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับอุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของ สารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับโดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)” ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดย นักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรือ อาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่า เป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT [22] [23]

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสาร ที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ 0 และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

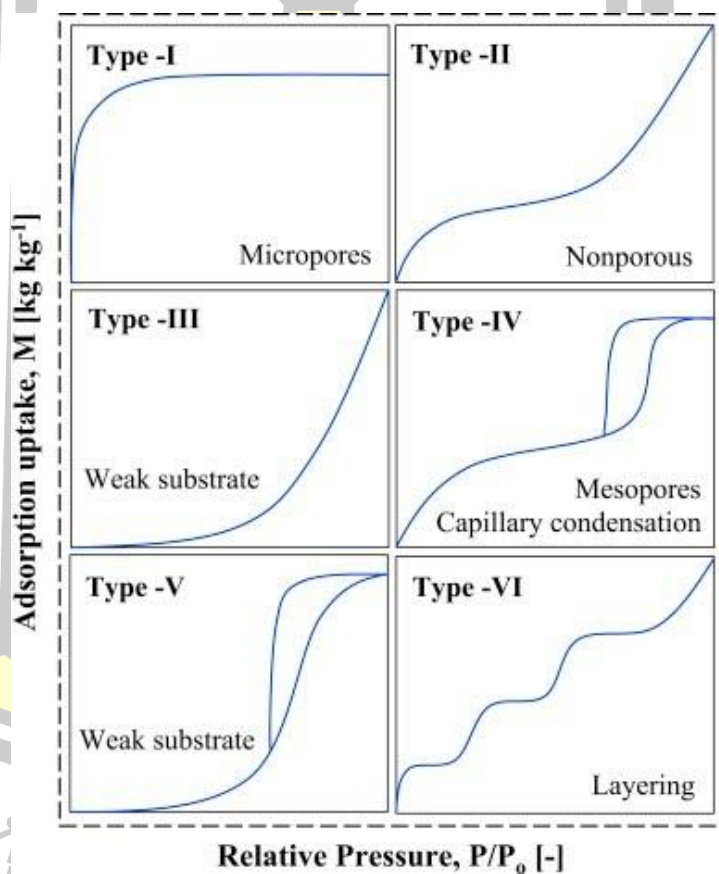
Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee Of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงาไอโซเทอมแบบ นี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็ง ที่ไม่มีความพรุน (Nonporous Solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดัน

สัมพันธ์ต่ำแต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพันธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีความดันสัมพันธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะ เหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพันธ์ สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis Loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารี สามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ในของแข็ง ที่มี รูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการ เกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis Loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก



ภาพประกอบ 8 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ที่มา : ศุณย์รังสิต [24]

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูก

ละลายบนผิวแข็งจะเป็นตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐาน คือ

1. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
3. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุล เท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใน ตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียง ได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณี ที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นชั้นเดียวเท่านั้น สมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (2.1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
 q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g)
 b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.2)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.6) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, RL) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1+bC_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบ เลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็น ไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

$$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \times \log C_e + \log K_F \quad (2.5)$$

เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
	q_e	คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล
	K_F	คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)
	n	คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมี จุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณา จากความชันของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อย แสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำค่า $1/n$ อธิบายถึง ไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับถ้า น้อยกว่า 1 และอธิบายถึง ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm)

แบบจำลองแบบทอธเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองขอลแลงเมียร์ และสามารถ ใช้ได้ในทั้งระบบที่มีความดันต่ำและความดันสูง

$$q = \frac{q_m \cdot B^P}{[1 + (B^P)^n]^{\frac{1}{n}}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	q	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)
	q _m	คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/L)
	B	คือ พารามิเตอร์ของไอโซเทอมบาร์ (บาร์ ⁻¹)
	P	คือ ความดันที่สมดุล (บาร์ ⁻¹)
	n	คือ พารามิเตอร์ของไอโซเทอม

ไอโซเทอมแบบเรดลิก-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm)

แบบจำลองของเรดลิก-เพเทอร์สันเป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานของแลงเมียร์ และฟรุนดิสแต้นกลไกการดูดซับจึงเป็นการผสมผสานแบบจำลองนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้นในอุดมคติ

$$q_e = \left(\frac{K_{RP} \cdot C_e}{1 + a_{RP} \cdot C_e} \right)^g \quad (2.7)$$

เมื่อ	K _{RP}	คือ ค่าคงที่ Redlich-Peterson (L g ⁻¹)
	a _{RP}	คือ ค่าคงที่ Redlich-Peterson (mg/L)
	g	คือ เลขชี้กำลังควรน้อยกว่า 1

ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm)

แบบจำลองของหลิวเป็นแบบจำลองที่ได้จากการรวมกันของแลงเมียร์และฟรุนดิส แต่ สมมติฐานของแบบจำลองแลงเมียร์และสมมติฐานการดูดซับที่ไม่มีที่สิ้นสุดของแบบจำลองของฟรุนดิส จะถูกทิ้งไป แบบจำลองของหลิวคาดการณ์ว่าตำแหน่งของตัวดูดซับไม่สามารถมีพลังงานเท่ากันได้ ดังนั้นตัวดูดซับจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันที่ไม่เลกุลต้องการยึดเกาะ อย่างไรก็ตามความอิ่มตัว ของตำแหน่งตัวดูดซับควรเกิดขึ้นแตกต่างจากแบบจำลองฟรุนดิส

$$q_e = \frac{q_m \cdot (K_g \cdot C_e)^{nL}}{1 + (K_g \cdot C_e)^{nL}} \quad (2.8)$$

เมื่อ	K _g	คือ ค่าคงที่สมดุลของหลิว (L mg ⁻¹)
	nL	คือ เลขชี้กำลังแบบไร้มิติของสมการ
	q _m	คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg g ⁻¹)

ไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm)

สมการของเทมคินเป็นการอธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งถูกพัฒนามาจากกระบวนการ ที่การเปลี่ยนแปลงของความร้อนในการดูดซับ และมีรูปแบบสมการ (2.9) และ (2.13)

$$q_e = \left(\frac{R \cdot T}{b} \right) \ln K_T \cdot C_e \quad (2.9)$$

$$q_e = \beta \ln K_T + \beta \ln C_e \quad (2.10)$$

เมื่อ	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.314 (J/molK)
	KT	คือ ค่าคงที่สมดุล (kJ/mg)
	B	คือ พลังงานการดูดซับ (kJ/mol)
	β	คือ ค่าคงที่ของเทมคิน (mol ² /kJ2)

2.4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นสมการที่ใช้อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับซึ่งจะให้ข้อมูลที่ประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการดูดซับได้ สมการ จลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง เทียม (Pseudo-first order, PFO) และอันดับสองเทียม (Pseudo-second order, PSO) ซึ่งเป็น สมการที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังมีสมการการแพร่ภายในรูพรุน เป็นอีกสมการหนึ่งที่น่าสนใจใช้อธิบายจลนพลศาสตร์และกลไกของการดูดซับได้อีกด้วย [25] สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์เคมี

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอยู่อย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียม อันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย [26]

1. สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order, PFO)

เป็นสมการที่อธิบายภายใต้สมมติฐานของการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วการดูดซับโดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับเองของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



โดยที่ A คือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (Adsorbent) และ A*S คือสารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$q_t = q_e (1 - \exp(-k_1 t)) \quad (2.12)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (min^{-1})

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.11) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ ถึง $q_e = t$ จะได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.13)$$

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้ดังสมการที่ (3)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-k_1/2.303$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2. สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order, PSO)

เป็นสมการที่อธิบายภายใต้การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



สามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม ได้ดังสมการที่ (2.14)

$$q_t = \frac{k_s * q_e^2 * t}{1 + q_e * k_s * t} \quad (2.16)$$

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (min^{-1})

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.14) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = t$ จะได้ดังสมการที่ (2.15)

$$h = k_s * q_e^2 \quad (2.17)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

3. แบบจำลอง Elovich

สมการของ Elovich ได้รับการพัฒนาโดย Zeldowitsch (Zeldowitsch, 1934) อย่างกว้างขวางเพื่อกำหนดการดูดซับก๊าซบนวัสดุที่เป็นของแข็ง (Rudzinski และ Panczyk, 2000; Heimberg et al., 2001) สมการเชิงประจักษ์กึ่งนี้ยังใช้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำหนดจลนพลศาสตร์ของลำดับที่สองสมมติว่าพื้นผิวที่เป็นของแข็งของของแข็งนั้นมีความหลากหลายแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสมการนี้ไม่แนะนำให้ใช้กลไกการดูดซับที่แน่นอน (Aharoni and Ungarish, 1976; Sparks, 1989) แบบจำลองนี้กำหนดจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทางเคมี (ต่ำ, 1960, Chien และ Clayton, 1980; Cheung et al., 2001) สมการ Elovich แทบจะไม่ได้ได้รับการฝึกฝนเพื่อการดูดซับสถานะของเหลวสมการ Elovich เป็นสมการอัตราอื่นตามความสามารถในการดูดซับซึ่งเขียนดังนี้ (ต่ำ, 1960) (ภาควิชาเคมี วิศวกรรมสถาบันอินเดียน, 2562)

$$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(1 + \alpha * \beta * t) \quad (2.18)$$

เมื่อ q_t คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ดูดซับบนพื้นผิวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)

t คือ เวลาติดต่อ (นาท)

α คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แสดงถึงอัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg/g นาท)

β คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แทนค่าคงที่การปลดปล่อย (g /mg)

4. Fractal-like pseudo first order model (FLPFO)

แฟร็กทัล p เหมือนหลอกรุ่นแรก (FPFO) ยิ่งไปกว่านั้นตามที่กล่าวโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ Azizian เกี่ยวกับสมการอัตรา Langmuir (Azizian, 2004) และการได้มาของแบบจำลองคำสั่งผสม 1,2 โดย Marczewski (Marczewski, 2010b) แบบจำลองลำดับแรกหลอกสามารถมาจกแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir (Azizian, 2004) หรือ MOE (Marczewski, 2010b) ภายใต้การพิจารณาที่แตกต่างกัน ดังนั้นรูปแบบที่เหมือนเศษส่วนของมันจึงสามารถได้มาจาก Fractal - เช่น Langmuir kinetic model หรือ Fractal - เช่น MOE (ภาควิชาเคมี วิศวกรรมสถาบันอินเดียน, 2562)

$$q_t = q_e * (1 - \exp(-k_1 * t^\alpha)) \quad (2.19)$$

เมื่อ	k_{PF0}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราหลอกลำดับแรก (1/นาทึ)
	k'_{FPFO}	คือ เศษส่วน - เช่นค่าสัมประสิทธิ์อัตราจลน์ของลำดับแรกหลอก (1/นาทึ)
	t	คือ เวลาติดต่ (นาทึ)
	h	คือ อัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg/g min)

5. Fractal-like pseudo second order (FLPSO)

เศษส่วน - เหมือนหลอกลำดับที่สอง (FPSO) เศษส่วนอีกครั้งเช่นรูปแบบของรูปแบบคำสั่งหลอกที่สองสามารถได้มาจากเศษส่วน-เช่นแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir หรือเศษส่วน เช่น MOE ดังต่อไปนี้ (Haerifar และ Azizian, 2012a; Haerifar และ Azizian, 2012b) (ภาควิชาเคมี วิศวกรรมสถาบันอินเดียน, 2562)

$$q_t = \frac{k_2 * q_e^2 * t}{1 + k_2 * q_e * t^\alpha} \quad (2.20)$$

เมื่อ	k''_{FPSO}	คือ การคูณ q_e และ k'_{FPSO} (1/นาทึ)
	k'_{FPSO}	คือ เศษส่วนเช่นค่าสัมประสิทธิ์อัตราจลน์หลอกลำดับที่สอง (s/mg min)
	q_e	คือ ปริมาณตัวดูดซับที่ดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์

เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่ นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและ

การคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudochemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง สมการ pseudo-first order และ pseudo-second order แสดงดังสมการ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ

$$\frac{dq}{dt} = k_1 (q_{eq} - q) \quad (2.21)$$

$$\frac{dq}{dt} = k_1 (q_{eq} - q)^2 \quad (2.22)$$

การศึกษาจลนพลศาสตร์การคายช่วยอธิบายกลไกการดูดซับและการแยกสารถูกดูดซับออกมาจากวัสดุดูดซับ สามารถใช้สมการ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยตัดแปลงให้อยู่ในรูปสัดส่วนของ q/q_e ตามสมการโดยหากข้อมูลการทดลองการคายสารอนิลฟีนอลจากเม็ดราตริงไรซ์วิต สอดคล้องกับสมการ pseudo first-order จะหมายถึงอัตราการคายถูกจำกัดด้วยการทำลายพันธะที่บริเวณผิวซึ่ง สารถูกดูดซับยึดกับวัสดุดูดซับที่บริเวณผิว อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายแปรผันตรงกับความเข้มข้น เมื่อจัดแจงสมการที่ (2.21) จะได้ดังสมการ (2.22)

$$-\frac{dq}{dt} = k_D q \quad (2.23)$$

อินทิเกรตสมการ (11) ภายใต้ขอบเขต $t = 0, q=0$ ถึง $t = t, q = q$ ได้สมการ (2.23)

$$\ln \left(\frac{q}{q_e} \right) = -k_D t \text{ or } \frac{q}{q_e} = \exp(-k_D t) \quad (2.24)$$

สำหรับสมการ pseudo second-order หลังจากถูกจัดรูปสมการและอินทิเกรตแล้วจะได้สมการ (2.24) ซึ่งแสดงว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายแปรผันตรงกับ กำลังสองของตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ไม่ถูก

$$\frac{q}{q_e} = 1 - \exp(-k_D t) \quad (2.25)$$

แบบจำลอง pore diffusion model (การแพร่ออกจากรูภายในของอนุภาค) เป็นการอธิบายกลไกการแพร่ออกจาก วัสดุดูดซับที่มีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งมีรัศมี, r โดยใช้สมมติฐานที่ว่า ความเข้มข้นภายนอกของผิวสัมผัสวัสดุดูดซับต้องมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการจะสอดคล้องกับการใช้ข้อมูลทดสอบการคายในช่วงเริ่มต้น ซึ่งยังเป็นช่วงที่ความเข้มข้นของสารละลายยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมาก

โดยเส้นกราฟจะอยู่ในรูปเส้นโค้งพาราโบลา (Ozkaya, 2006) ตามสมการ (2.21) เพื่อคำนวณหาค่า อัตราการแพร่ (diffusivity rate; D/r^2) (15)

$$\frac{q}{q_e} = \sqrt{\frac{Dt}{r^2\pi}} \quad (2.26)$$

2.5 ทองแดง (Copper)

ทองแดงนับเป็นโลหะที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งานเป็นเวลานาน ทองแดงมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu ซึ่งมาจากภาษาลาตินว่า Cuprum หมายถึง ชื่อเกาะไซปรัส (Cyprus) เป็นแหล่งแร่ทองแดงขนาดใหญ่ที่มีการค้นพบและนำโลหะทองแดงมาใช้ประโยชน์ โดยนำมาทำเครื่องมือใช้สอยและอาวุธต่างๆ แม้ในปัจจุบันทองแดงก็ยังเป็นโลหะที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นที่สำคัญหลายประการ แร่ทองแดงสามารถพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญของโลก ได้แก่ ชิลี เปรู สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เป็นต้น โดยเหมืองแร่ทองแดงที่ใหญ่ที่สุดในโลกอยู่ที่ชุกุยคามาดา ประเทศชิลี รวมถึงประเทศเพื่อนบ้านของประเทศไทยอย่างประเทศ สปป.ลาว [27] ในปัจจุบันการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นปัญหาที่มีแหล่งกำเนิดจากกระบวนการทางธรรมชาติจากการสลายตัวของแร่โลหะต่างๆ เช่น เกิดจากการผุพังของหิน ดิน แร่ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ การปล่อยของเสียที่มีโลหะหนักปนอยู่ลงสู่แม่น้ำธรรมชาติ โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน การสะสมโลหะหนักดังกล่าวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงตามลำดับชั้นของห่วงโซ่อาหารและหากมีปริมาณมาก ก็อาจทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำนั้นๆ ตลอดจนผู้คนที่นำสัตว์น้ำนั้นไปเป็นอาหารด้วย [28] สังกะสี แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และนิเกิล เป็นโลหะที่มีประโยชน์ในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันต่างๆ เช่น เป็น โลหะผสมป้องกันสนิม มุงหลังคา สายไฟฟ้า มอเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม และเป็นโลหะผสมต่อการกัดกร่อน พิษของโลหะหนักส่วนใหญ่ทำลายระบบประสาท สมอง กล้ามเนื้อ ความรู้สึกสัมผัส ทำให้สายตาเสื่อม อาจเป็นมะเร็งได้ และอาจเสียชีวิตได้ [28]



ภาพประกอบ 9 โรงงานปล่อยน้ำเสียลงแม่น้ำ
ที่มา : โรงงานอุตสาหกรรม [29]

2.5.1 คุณสมบัติของทองแดง

ทองแดงเป็นธาตุทรานสิชันตัวแรกของหมู่ IB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.546 มีความหนาแน่น 8.92 g/cm^3 เป็นธาตุที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในรูปของแร่ส่วนใหญ่พบในรูปของซัลไฟด์ ได้แก่ คาลโคไซด์ (chalcocite) Cu_2S , โคเวลไลต์ (covellite) CuS , คาลโคไพไรต์ (chalcopyrite) CuFeS_2 และ โบไมต์ (bomite) Cu_3FeS_3 เป็นต้น คุณสมบัติที่ทำให้ทองแดงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท คือ ความแข็งแรง, สภาพการเป็นตัวนำ, ความต้านทานการกัดกร่อน, การแปรรูป และความอ่อน เราสามารถเพิ่มคุณสมบัติของทองแดงได้โดยการเปลี่ยนส่วนผสม และวิธีการผลิต [30]

- สภาพการนำไฟฟ้า: ทองแดงเป็นโลหะในทางวิศวกรรมที่ถูกใช้ทำเป็นตัวนำไฟฟ้ามากที่สุด โดยที่เงิน และธาตุอื่นๆ อาจถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันการอ่อนตัว หรือเพื่อเพิ่มคุณสมบัติอื่นๆ โดยที่ไม่ทำให้เสียสภาพการนำไฟฟ้า
- สภาพการนำความร้อน: เป็นคุณสมบัติเดียวกันกับสภาพการนำไฟฟ้า โลหะผสมทองแดงอาจถูกใช้เพื่อให้ความต้านทานการกัดกร่อน กล่าวคือความสามารถในการนำความร้อนจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอัลลอยด์ ในขณะที่ความต้านทานการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น
- สี และลักษณะที่ปรากฏ: โดยทั่วไปแล้วทองแดงจะมีสีเฉพาะ และอาจเปลี่ยนสีได้โดยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ อัลลอยด์ส่วนมากสามารถทำการเตรียมการ และบำรุงรักษามาตรฐานของพื้นผิวได้ง่าย ถึงแม้จะมีสภาวะการกัดกร่อนที่ไม่พึงประสงค์ อัลลอยด์ส่วนใหญ่ถูกใช้ในการปรับสภาพให้ทองแดงมีความเหมาะสมกับการใช้งาน ตั้งแต่การขึ้นรูปหรือภายหลังจากการชุบโลหะ โดยที่อัลลอยด์แต่ละชนิดจะให้สีเฉพาะตัวออกมาเริ่มตั้งแต่สีชมพูแซลมอน จนถึงสีเหลือง ส่วนสีทอง และเขียวจนถึงบรอนซ์ดำ จะเกิดจาก

สภาพอากาศ โดยการสัมผัสกับบรรยากาศสามารถทำให้พื้นผิวทองแดงเป็นสีเขียว หรือ บรอนซ์ดำได้ หรือการทำอัลลอยด์พื้นผิวสนิมในรูปแบบผลิตภัณฑ์บางประเภท

- ความต้านทานการกัดกร่อน: โลหะผสมทองแดงจะป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำ และไอน้ำได้ โลหะผสมทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสภาพอากาศของชนบท, ในทะเล และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ทองแดงสามารถป้องกันน้ำเกลือ, ดิน, แร่ธาตุที่ไม่เกิดการออกซิเดชัน, กรดอินทรีย์ และการกัดกร่อน แต่แอมโมเนีย, ฮาโลเจน, ซัลไฟด์, สารละลายที่มีแอมโมเนียไอออน และกรดออกซิไดซ์ จะทำลายทองแดงได้ เช่นเดียวกับโลหะผสมทองแดงที่ป้องกันการดออินทรีย์ได้เพียงเล็กน้อย โดยความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงจะมาจากการสร้างแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุ และฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนโลหะ
- ความอ่อนสามารถปรับปรุงได้โดยการอบอ่อน: สามารถทำได้โดยกระบวนการอบอ่อน หรือโดยการเชื่อม หรือขั้นตอนการประสาน
- การชุบแข็ง/การเพิ่มความแข็ง: มีรูปแบบการเพิ่มความแข็งโดยทั่วไปอยู่ 4 รูปแบบของทองแดง คือ การเพิ่มความเครียด (strain hardening), การเพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลายของแข็ง (solid-solution hardening), การทำให้เกิดสารประกอบขนาดเล็ก (precipitation hardening) และ การเพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายตัวของเฟสที่สอง (dispersion strengthening) ส่วนรูปแบบที่ห้าคือ spinodal decomposition เป็นรูปแบบที่ใช้ในการค้าขายโดยตรง แต่จะประกอบด้วย ทองแดง-นิกเกิล-ดีบุก เท่านั้น การผสมกลไกการเพิ่มความแข็งแรงถูกใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลขั้นสูงสำหรับโลหะผสมทองแดงขั้นสูง

2.5.2 ประโยชน์ของทองแดง

สำหรับประโยชน์ของทองแดง มีหลายประการด้วยกันดังนี้ [31]

1. มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าเป็นอันดับสอง จึงนิยมนำมาใช้ทำลวดส่งกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ทั้งช่วยป้องกันการไหม้ของสายไฟได้ดี
2. ใช้เป็นส่วนผสมสำคัญ ในโลหะผสมหลายชนิด เช่น ทองเหลือง โมเนลและสำริด เป็นต้น
3. เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ โดยใช้ผสมกับเงิน และทอง
4. ใช้ในการทำเครื่องประดับและเหรียญตราต่างๆ ซึ่งจะได้เครื่องประดับที่สวยงาม และทนทานอย่างมาก[30]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bin Yu, Y Zhang, Alka Shukla, Shyam S Shukla, Kenneth L Dorris [32] การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายที่เป็นน้ำโดยการดูดซับขี้เลื่อย การกำจัดทองแดง : ขี้เลื่อยที่หาได้ในท้องถิ่นซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมโลก พบว่าเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำและมีแนวโน้มดีสำหรับการกำจัดทองแดง (II) ออกจากน้ำเสีย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงบนขี้

เลื้อยโดยใช้เทคนิคแบทช์ ระดับการดูดซับที่สมดุลถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของ pH ของสารละลาย เวลาสัมผัส และความเข้มข้นของซอร์เบต ความสามารถในการดูดซับสมดุลของซีเลื้อยสำหรับทองแดง ได้มาจากการใช้ไอโซเทอมเชิงเส้นของ Freundlich และ Langmuir การแลกเปลี่ยนไอออนอาจเป็นหนึ่งในกลไกการดูดซับที่สำคัญในการจับไอออนโลหะสองตัวกับซีเลื้อยเมเปิ้ล ผลลัพธ์ที่ได้ให้หลักฐานที่ชัดเจนเพื่อสนับสนุนสมมติฐานของกลไกการดูดซับ นอกจากนี้ยังให้ข้อมูลกำลังการผลิตซีเลื้อยที่สำคัญสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม

Zdenka Kovacova, Stefan Demcak, Magdalena Balintova [33] การกำจัดทองแดงออกจากสารละลายน้ำโดยการดูดซับบนซีเลื้อย: มลพิษทางน้ำจากองค์ประกอบที่เป็นพิษเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่สร้างความกังวลต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่นเดียวกับคุณภาพสิ่งแวดล้อม และได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมาก วิธีการบำบัดน้ำเสียแบบใหม่และราคาถูกกำลังเพิ่มคุณภาพสิ่งแวดล้อมและลดผลกระทบด้านลบต่อสัตว์ พืช และมนุษย์ เทคนิคการดูดซับถือเป็นวิธีการที่คุ้มค่าสำหรับการกำจัดโลหะหนักอย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการศึกษาเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับการใช้ตัวดูดซับต้นทุนต่ำ เช่น เปลือกไม้ วัสดุที่อุดมด้วยแทนนิน ลิกนิน พีทมอสโคโคซาน และซีเลื้อย บทความที่น่าสนใจอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับของซีเลื้อยไม้สปรูซ เพื่อกำหนดความเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย จึงมีการศึกษาการจัดทองแดงออกจากแบบจำลองการแก้ปัญหา

Henrik K. Hansen, Fernanda Arancibia, Claudia Gutiérrez [34] การดูดซับทองแดงลงบนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกรรมการทำเหมืองทำให้เกิดน้ำเสียจำนวนมาก ซึ่งมีโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงตามค่าเกณฑ์ทางกฎหมาย ดังนั้นการรักษาจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น และล่าสุดได้ให้ความสำคัญกับวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น หนึ่งในนั้นคือการดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งโลหะหนักจะถูกดูดซับจากน้ำเสียผ่านทางวัสดุที่มีแหล่งกำเนิดทางชีวภาพ ในงานวิจัยนี้ ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดง จลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ต้นทุนต่ำที่แตกต่างกัน ตรวจสอบวัสดุที่แตกต่างกัน 7 ชนิด ได้แก่ เปลือกถั่วลิสง เปลือกถั่ว เมล็ดพลัม เปลือกต้นยูคาลิปตัส เม็ดมะกอก หินพีช และซีเลื้อยสน ผลการดูดซับที่ดีที่สุดคือค่า pH ที่เป็นกรดสำหรับเม็ดมะกอก หินพีช และซีเลื้อยไม้สน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่า pH ที่สูงขึ้น ต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นก่อนที่จะสร้างสมดุล โดยทั่วไป ตัวดูดซับทางชีวภาพที่ดีกว่าคือหินพีชและซีเลื้อยไม้สนที่มีความสามารถในการดูดซับที่ pH ที่เป็นกรดประมาณ 10–15 มก. Cu g^{-1} ตัวดูดซับทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองลำดับที่สองของ Ho และ McKay อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับได้อย่างน่าพอใจมาก ทั้งแบบจำลอง Langmuir และ Freundlich อธิบายไอโซเทอมการดูดซับที่สมดุลได้ดีสำหรับตัวดูดซับทางชีวภาพที่ศึกษา โดยแบบจำลองที่لاءจะดีกว่าเล็กน้อย

Clara Isabel Orozco, M. Sonia Freire, Diego Gómez-Díaz, Julia González-Álvarez [35] การกำจัดทองแดงออกจากสารละลายที่เป็นน้ำโดยการดูดซับทางชีวภาพบนซีเลื้อยไม้สน: ซีเลื้อย *Pinus radiata* ที่ไม่ผ่านการบำบัดได้รับการตรวจสอบเพื่อกำจัดไอออน Cu^{+2} ออกจากสารละลายที่เป็นน้ำ ชีวมวลมีลักษณะเฉพาะด้วยสเปกโตรเมตรีพลาสมา-แมสแบบเหนี่ยวนำ (ICP-MS) และด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (SEM-EDX), การเลี้ยวเบนของผงผลึกริงส์ไบเอกซ์ (XRD) และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) สเปกโทรสโกปี ก่อนและหลังการดูดซับ ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส (ขึ้นอยู่กับสถานะสมดุล),

ปริมาณสารดูดซับ (1–50 ก./ลิตร), ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น (5–300 มก./ลิตร) และ pH (2–8) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงผ่านการทดลองแบบแบทช์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าถึงจุดสมดุลของการดูดซับในเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมงและสภาวะที่ดีที่สุด (เปอร์เซ็นต์การกำจัด Cu^{+2} , 93.4% และความสามารถในการดูดซับ 0.82 มก./ก.) ทำได้โดยการเพิ่มปริมาณสารดูดซับสูงสุด 5 ก./ลิตร และ pH ของสารละลายสูงถึง 7 และลดความเข้มข้นของโลหะเริ่มต้นเป็น 5 มก./ลิตร การดูดซับได้รับการปรับให้เหมาะสมโดยการออกแบบการทดลองของ Doehlert ที่วิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณสารดูดซับ (5–15 ก./ลิตร) และความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง (5–45 มก./ลิตร) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ข้อมูลจลนศาสตร์ได้รับการติดตั้งแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองอย่างน่าพอใจ แบบจำลองการแพร่กระจายภายในอนุภาคแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนต่าง ๆ มีส่วนร่วมในกระบวนการดูดซับ ไอโซเทอมของ Langmuir เหมาะสมกับข้อมูลสมดุลของการดูดซับทองแดงอย่างน่าพอใจ การศึกษาการดูดซับบรรลุประสิทธิภาพสูงถึง 94.5% และศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดขึ้นใหม่ของซีลีเนียมด้วยรอบการดูดซับสี่รอบ ดังนั้น การศึกษานี้จึงแสดงหลักฐานว่าซีลีเนียมเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ หมุนเวียนได้ และประหยัดสำหรับการกำจัดโลหะ และการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวถือเป็นทางเลือกสำหรับการจัดการและการเพิ่มคุณค่า

R. Singh, R. Kaur, K. Lal, K.G. Rosin, M. Srivastava, Ashish Shukla [36] การเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับโครเมียม และทองแดง บนซีลีเนียมที่ผ่านการบำบัดทางเคมีโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง: โครเมียม และทองแดง เป็นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่สำคัญที่สุด ซึ่งปล่อยลงสู่ทางน้ำใกล้เคียงโดยตรงซึ่งสร้างมลพิษทางน้ำ น้ำเสียที่มี Cr(VI) ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การพอกหนักร การเคลือบพื้นผิวพลาสติก และทำให้เกิดมะเร็งในระบบทางเดินอาหารและปอด ทองแดง(II) พบในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการระบายกรดและโรงงานชุบสังกะสี และปริมาณที่สูงขึ้นจะนำไปสู่โรคโลหิตจาง ไตและตับถูกทำลาย ซีลีเนียมเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมไม้ที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพสำหรับการกำจัดโลหะหนัก ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการศึกษาศักยภาพของซีลีเนียมในการกำจัด Cr(VI) และ Cu(II) จากสารละลายที่เป็นน้ำผ่านกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์ ใช้วิธีการพื้นผิวการตอบสนองสำหรับการปรับตัวแปรให้เหมาะสมเช่น ความเข้มข้นของโลหะ ค่า pH และความสูงของเสา สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโครเมียมสูงสุด (89.74 %) และทองแดง (93.17 %) จากตัวกลางที่เป็นน้ำคือ: ความสูงของคอลัมน์เบด (20 ซม., 20 ซม.), ความเข้มข้นเริ่มต้น (30 มก./ลิตร, 10 มก./ลิตร) และ pH (2, 4) ตามลำดับ ผลการวิจัยระบุว่าซีลีเนียมเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพ และราคาไม่แพงสำหรับการกำจัด Cr(VI) และ Cu(II) จากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่ทำการวิจัย

การเผาถ่านชาร์ไร้อากาศ ดำเนินการที่ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
การทดลองวิจัย ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรจำเพาะของรูพรุน ดำเนินการที่ตึกศูนย์
เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การถ่ายภาพของถ่านชาร์จากซีลื้อและพลาสติกที่เตรียมได้ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่อง
กราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ดำเนินการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 การเตรียมถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

3.2.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้สมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process) ดัง
แสดงในภาพประกอบ 10

3.2.1.2 แก๊สหุงต้มใช้ทำความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 11

3.2.2 สารเคมีและวัสดุดิบ

3.2.2.1 กระดูกวัวและหมูจาก อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

3.2.2.2 เครื่องซังไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรดเบส (pH Meter)

3.2.2.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.2.5 ควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

3.2.2.6 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.2.2.7 กระดาษกรอง GF/C

3.2.2.8 ชุดกรอง ประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม. และขวดกรอง

3.2.2.9 ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2.2.10 จุกปิดแก้ว (Glass stopper)

3.2.2.11 ปากคีบ (Forceps pointed end)

3.2.3 วิธีการทดลอง

3.2.3.1 การเตรียมถ่านซีเลื้อยและพลาสติก

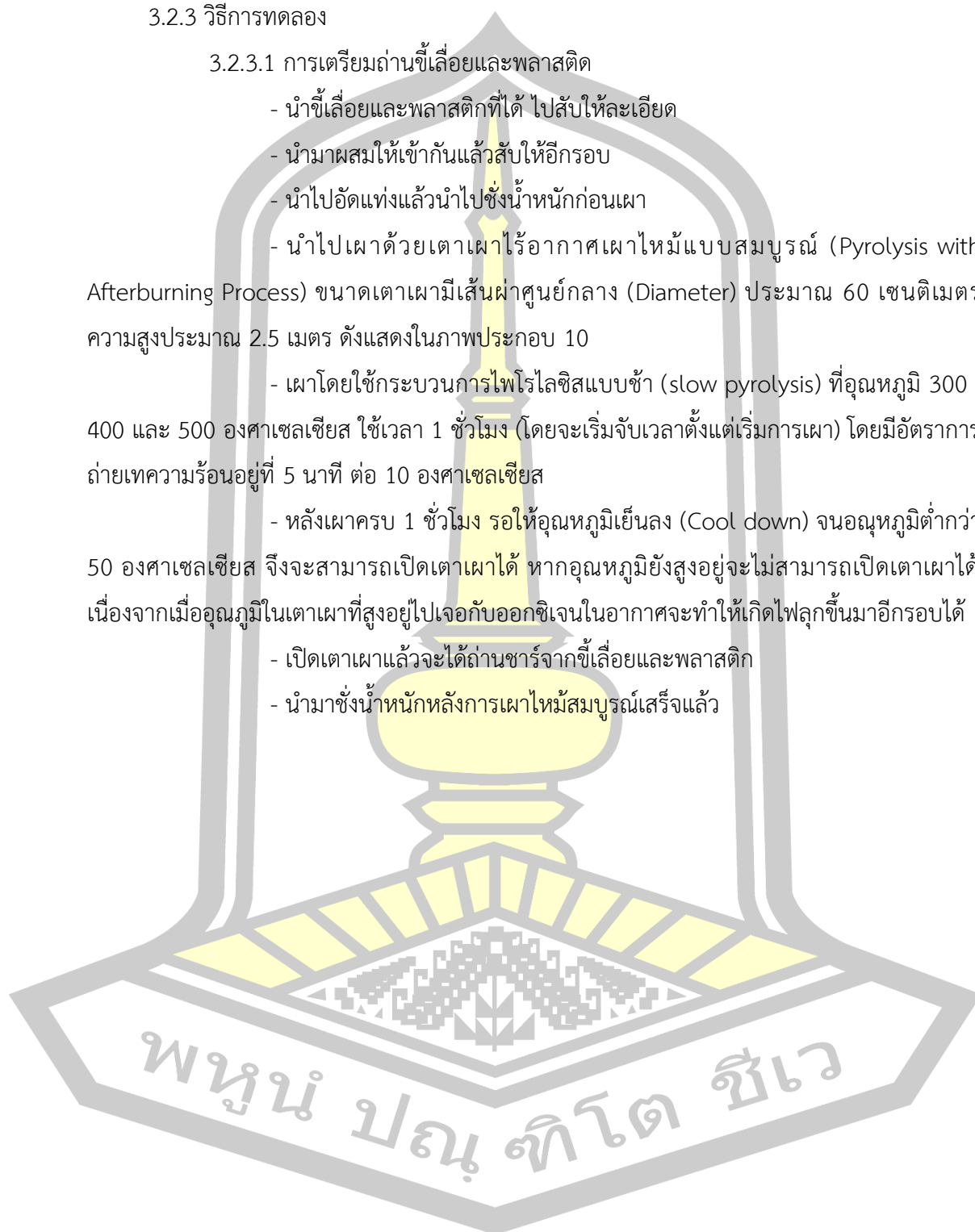
- นำซีเลื้อยและพลาสติกที่ได้ ไปสับให้ละเอียด
- นำมาผสมให้เข้ากันแล้วสับให้อีกรอบ
- นำไปอัดแท่งแล้วนำไปชั่งน้ำหนักก่อนเผา
- นำไปเผาด้วยเตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with

Afterburning Process) ขนาดเตาเผา มีเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) ประมาณ 60 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 2.5 เมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 10

- เเผาโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง (โดยจะเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มการเผา) โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 5 นาที่ ต่อ 10 องศาเซลเซียส

- หลังเผาครบ 1 ชั่วโมง รอให้อุณหภูมิเย็นลง (Cool down) จนอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถเปิดเตาเผาได้ หากอุณหภูมิยังสูงอยู่จะไม่สามารถเปิดเตาเผาได้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในเตาเผาที่สูงอยู่ไปเจอกับออกซิเจนในอากาศจะทำให้เกิดไฟลุกขึ้นมาอีกรอบได้

- เปิดเตาเผาแล้วจะได้ถ่านชาร์จากซีเลื้อยและพลาสติก
- นำมาชั่งน้ำหนักหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เสร็จแล้ว





ภาพประกอบ 10 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process)

ที่มา : มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ



ภาพประกอบ 11 แก๊สหุงต้ม (cooking gas)

พูน ปณ จิโต ชีเว



ภาพประกอบ 12 ขี้เลื่อยและขยะพลาสติกที่เผาแล้ว

3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar)

3.3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX) ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ : ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วแต่ ภาชนะที่รองรับด้วย (มีขนาดเล็กจะดีกว่า เนื่องจากตัวอย่างจะสามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนลงกราวด์ได้ดีกว่า ป้องกันการ (Charging effects) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX)

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

3.3.1.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) สารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช) ปริมาณผงตัวอย่างที่เหมาะสมประมาณ 1-2 กรัม (หากตัวอย่างมีน้อย สามารถอัดบนแผ่นวางตัวอย่างแบบ zero background ได้) และอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีต้องมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (random orientation) หากตัวอย่างเป็นก้อน ต้องตัดและขัดหน้าตัวอย่างให้เรียบ ขนาดก้อนตัวอย่างประมาณ 10 x 10 เซนติเมตร การเตรียมตัวอย่าง ที่ดีมีผลมากต่อผลการวิเคราะห์เช่น หากบดตัวอย่างละเอียดเกินไปจะทำให้ลายโครงสร้างผลึกหรือหากใช้แรงอัดตัวอย่างมากเกินไปจะทำให้เกิด Preferred Orientation ขึ้นได้





ภาพประกอบ 14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)
ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [37]

3.3.1.3 เครื่องฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียมดังนี้

1. บดตัวอย่างให้มีความละเอียด
2. ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ในโถรงบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ 15,000 กิโลกรัม 1-2 นาที
4. ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์มีลักษณะเป็นวงกลมใส และตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR ได้เลย
5. การทำความสะอาดแม่พิมพ์ใช้ช้อนตักสารสแตนเลส ขูดตัวอย่างออกมา เช็ดด้วยกระดาษทิชชูและล้างด้วยอะซิโตนแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพประกอบ 15 เครื่องฟลูอิดรีทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [38]

3.3.1.4 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายของรูพรุน ปริมาตรของรูพรุน ในแบบต่างๆด้วยวิธีให้ตัวอย่างมีการดูดซับหรือคายก๊าซ เพื่อวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน พื้นที่ผิวของผงตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของ Volumetric gas adsorption method เช่น N_2 , Ar_2 , CO_2 , H_2 และก๊าซไม่ก่ดกร่อนอื่น ๆ BETเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ประมาณ 0.3-0.5 กรัมสถานะของแข็ง เช่น อนุภาคผง เม็ด แผ่นฟิล์ม เป็นต้น ต้องไม่ฟุ้งกระจายมากและไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันหากเป็นตัวอย่างอัดเม็ดจะต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และต้องทำการ อบตัวอย่างมาก่อน



ภาพประกอบ 16 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET)

ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [39]

ความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเตรียมในสารละลายกรดที่มีค่า pH ไม่เกิน 2 ของถ่านชาร์จากชีเลื่อยและขยะพลาสติก หาได้จากการเปรียบเทียบปริมาณทองแดงก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านชาร์จากชีเลื่อยและขยะพลาสติก ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะทองแดงคำนวณจากสมการ

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{\text{mass}} * V \quad (3.1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ

C_0 คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L) เริ่มต้น

C_e คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L) ที่สมดุล

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

Mass คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ การทดลองเป็นการทดสอบในระบบแบบกะ (Batch system) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (triplicate experiments) และมีชุดควบคุม โดยใช้ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้ปริมาณ 1 กรัม โดยใช้เครื่อง ชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้นเติมลงไปในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตร 100 มิลลิตร ของสารละลายทองแดงสังเคราะห์ หลังจากเวลาผ่าน 24 ชั่วโมง กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับ หลังจากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer ที่ความเข้มที่แตกต่างกัน แล้วนำค่าที่ได้ไปวัดหาความสามารถในการดูดซับ ดังสมการที่แสดง 3.1

นำผลที่ได้จากการทดลองไปหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่คำนวณความสามารถในการดูดซับต่อเวลา และศึกษาการดูดซับด้วยสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ,ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ,ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm) ,ไอโซเทอมแบบเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm) ,ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm) และไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm)

3.5 วิธีการทดลอง

การทดลองเป็นการทดสอบในระบบแบบแบทช์ (Batch system) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (triplicate experiments)

3.5.1 การทดลองหาปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมลงในขวดรูปชมพู่ที่มีความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 2000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร
- ทิ้งไว้ 24 ชม. จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.2 การทดลองหาความเข้มข้นโลหะหนักทองแดงที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar ปริมาณ 1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.3 การทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมกับการดูดซับ

- ทำการชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar ปริมาณ 1 กรัม
- ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL เติมน้ำละลายมาตรฐาน สารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรทเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที
- กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer ที่
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.4 การทดลองค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ

- เตรียมสารละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรทเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 ml
- ปรับค่า pH ให้อยู่ที่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 โดยใช้เครื่อง pH Meter
- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar ปริมาณ 1 กรัม เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL ที่เตรียมไว้
- ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.5 การทดลองอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar ปริมาณ 1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

- เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง Water Bath
- ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการนำผลจากการทดลอง ระยะเวลาการดูดซับและ ความสามารถในการดูดซับ มาทำการทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ ดังนี้

- ทำการชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL เติมน้ำละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรท เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

- ทำการกวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่ 100 รอบต่อนาที เป็น เวลา 10, 30, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 720 และ 960 นาทีนำผล ที่ได้จากการทดลองไปหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่คำนวณหาความสามารถในการดูดซับต่อเวลา และ ศึกษากลไกการดูดซับด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) สมการปฏิกิริยาอันดับ สอง (Pseudo-second order) Elovich Isotherm Fractal-like pseudo first order model (FLPFO) Fractal-like pseudo second order (FLPSO) และ General order

วิเคราะห์การถดถอยทางสถิติแบบ Nonlinear Regression เพื่อหาค่าคงที่ในการแบบจำลอง อัตราการดูดซับโดย การวิเคราะห์ข้อผิดพลาด (Error analysis) ผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Residual Sum of Squares Error, SSE) ที่เหลือน้อยที่สุด (Reduced Chi square, Reduced χ^2) สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (Coefficient of determination, R^2) (Minimize Residual Root Mean Square Error RMSE) โดยใช้โปรแกรม OriginPro

3.7 เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจาก ข้อ 3.3 มาใช้ในการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์ สมการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ΔG° [40] ได้จากสมการที่ (3.2)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L \quad (3.2)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล องศาเคลวิน และ T คือ อุณหภูมิ สมบูรณ์ (องศาเคลวิน) ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS°) คำนวณได้จากค่าความชัน และจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ [40] ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$\ln K_L = \frac{(\Delta S^\circ)}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (3.3)$$

- เมื่อ K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
 ΔG° คือ พลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย (KJ/mol)
 ΔH° คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (KJ/mol)
 ΔS° คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (KJ/mol)
R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 KJ/mol)
T คือ อุณหภูมิคงที่ในหน่วยเคลวิน (K)

พหุ ประสิทธิภาพ

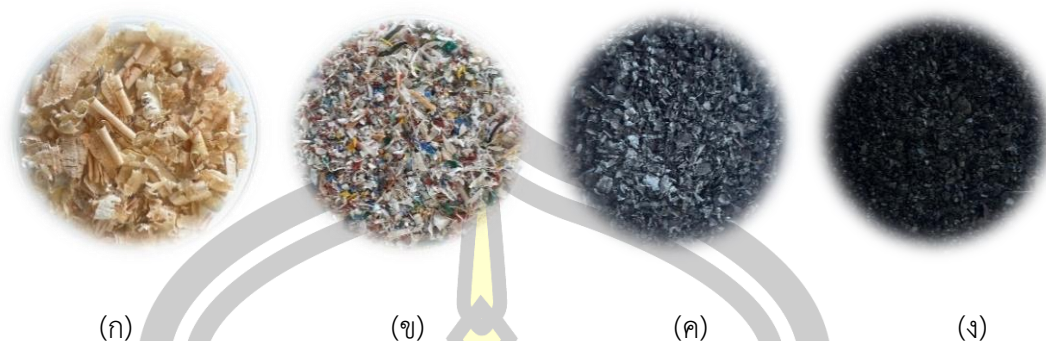
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ลักษณะทางกายภาพของ Sawdust Plastic Biochar (SP Biochar) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

วัตถุดิบขี้เลื่อยและขยะพลาสติก (วัสดุที่ไม่สามารถขึ้นรูปสำหรับกระบวนการรีไซเคิล PP) ได้จากโรงงาน (จังหวัดชัยภูมิ) ประเทศไทย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 17 (ก,ข) ขนาดของวัตถุดิบทั้งสองเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 ซม. – 2.0 ซม. วัตถุดิบขี้เลื่อยและขยะพลาสติกถูกทำให้แห้งที่ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำวัตถุดิบขี้เลื่อยและขยะพลาสติกมาผสมรวมกันให้ได้ตามอัตราส่วนประมาณ 4 : 1 (ขี้เลื่อย, กรัม) (ขยะพลาสติก, กรัม) รวมประมาณ 1 กิโลกรัม ถูกใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ดัดแปลง (OD=60 ซม., สูง=1 เมตร) ใช้กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการเตรียมถ่าน ไบโอชาร์ โดยใช้เชื้อเพลิง LPG อุณหภูมิสำหรับไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นที่ 12°C ต่อนาที อัตราการให้ความร้อน จากนั้นควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้ 300, 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากนั้น ตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ถ่านชาร์ ที่ทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยพลาสติกผสมที่เตรียมไว้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 17 (ค) หลังจากนั้นจะถูกบดด้วยครกหินอ่อนเพื่อเตรียมถ่านไบโอชาร์แบบผง ภาพประกอบที่ 17 (ง) และถูกเก็บไว้สำหรับการวิเคราะห์ เช่น FTIR, SEM-EDX และ BET [41]

จากภาพประกอบที่ 17 ก่อนการเผาลักษณะของพลาสติกมีการผ่านกระบวนการสับและบดทำให้มีชิ้นส่วนเล็กลง มีความเหนียวไม่สามารถดึงให้ขาดได้ด้วยมือเปล่า และมีหลากสี ในส่วนของขี้เลื่อยก่อนการเผามีลักษณะเหมือนเส้นใย เป็นแผ่นขนาดเล็กที่ผ่านการเลื่อยจากโรงงาน มีความนุ่มไม่บาดมือ สีน้ำตาล หลังจากนำทั้งสองวัตถุดิบผสมกันแล้วนำไปเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C โดยลักษณะของขี้เลื่อยพลาสติกเป็นสีดำ มีความเปราะ มันวาวเกิดจากน้ำส้มควันไม้ ลักษณะของถ่านยังคงรูปร่างเป็นขี้เลื่อยอยู่ ส่วนพลาสติกจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเผา เมื่อนำมาบดให้เป็นผงถ่านจะมีลักษณะเป็นผงสีดำ

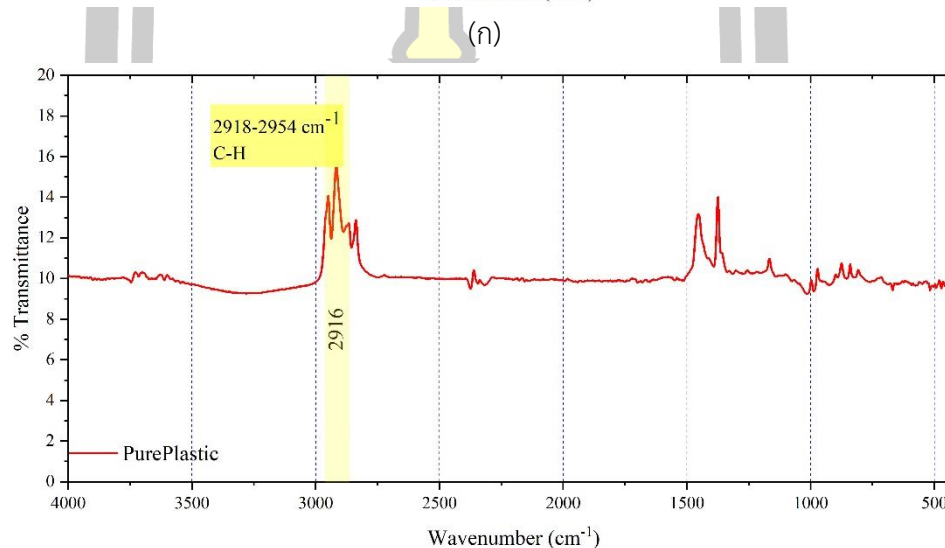
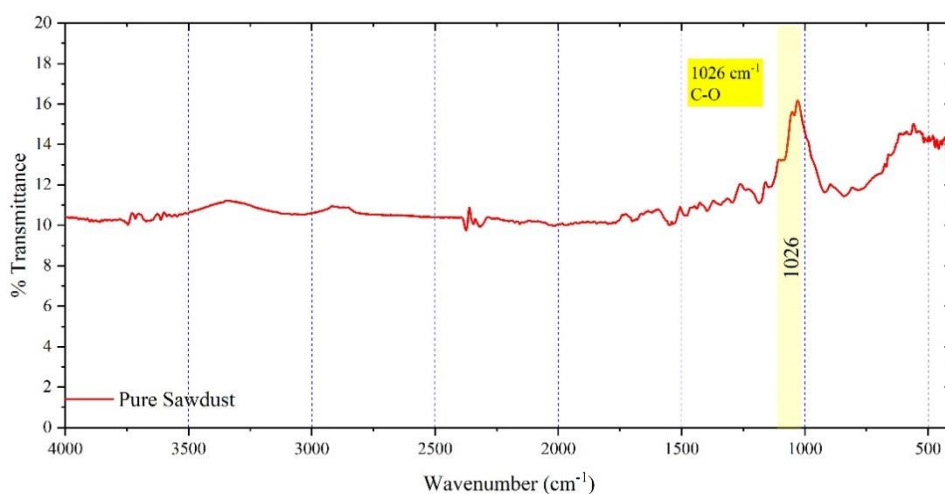


ภาพประกอบ 17 ภาพถ่ายของวัตถุดิบและถ่านชาร์ที่เตรียมได้ (ก) ขยะพลาสติก (ข) ชี้้เลื่อย (ค) SP Biochar และ (ง) SP Biochar แบบผง

4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

รังสีอินฟราเรดตั้งอยู่ในสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างแสงที่มองเห็นและไมโครเวฟ และมีความสัมพันธ์กับโหมดการสั่นของโมเลกุล เมื่อแสงอินฟราเรดติดต่อกับตัวอย่าง ความยาวคลื่นบางส่วนถูกดูดซับโดยตัวอย่าง ในขณะที่คลื่นความยาวอื่น ๆ ถูกส่งผ่านหรือสะท้อน โดยการวิเคราะห์คลื่นที่ถูกดูดซับ FTIR spectroscopy สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของการเชื่อมโยงทางเคมีที่ปรากฏในตัวอย่างและระบุกลุ่มฟังก์ชัน สเปกตรัม FTIR ที่ได้รับแสดงปีกที่คลื่นยาวที่ระบุ ที่สอดคล้องกับการดูดซับของคลื่นอินฟราเรดที่ระบุโดยตัวอย่าง กลุ่มฟังก์ชันที่แตกต่างกันในโมเลกุลมีแถบดูดซับที่เป็นลักษณะเฉพาะ ทำให้สามารถระบุการปรากฏของกลุ่มบาง ๆ และกำหนดสมบัติทางเคมีของตัวอย่าง สเปกตรัมยังสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มฟังก์ชันที่เฉพาะเจาะจง

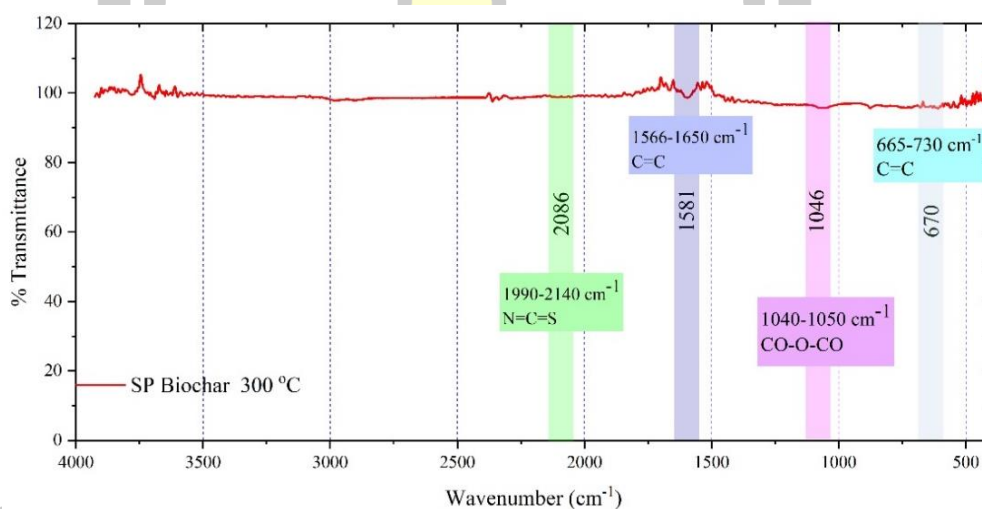
ภาพประกอบ 18 (ก) แสดงถึงฟังก์ชัน FTIR ของชี้้เลื่อยและพลาสติกก่อนการเผาด้วยการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าชี้้เลื่อยจะมีจุดฟังก์ชันมากกว่า 1 จุด ที่ตำแหน่ง 1026 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน (C-O stretching) ชนิดของอีเทอร์ (ether) หรือ C-N stretching ของอะตอมไนไตรล์ ของอีเทอร์ไนไตรล์ (ethyl nitrite) ภาพประกอบ 18 (ข) แสดงถึงฟังก์ชัน FTIR ของชี้้เลื่อยและพลาสติกก่อนการเผาด้วยการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าพลาสติกจะมีจุดฟังก์ชันมากกว่า 1 จุด โดยมีตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 2916 ตั้งอยู่ระหว่าง $2918\text{--}2954\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ฟังก์ชัน (C-H stretching) ของชนิดอัลเคน (alkane) หรือ C-H stretching ของชนิดอัลดีไฮด์ (aldehyde)



ภาพประกอบ 18 FTIR ของวัสดุที่ใช้ดูดซับ (ก) ขี้เลื่อย และ (ข) พลาสติก PP

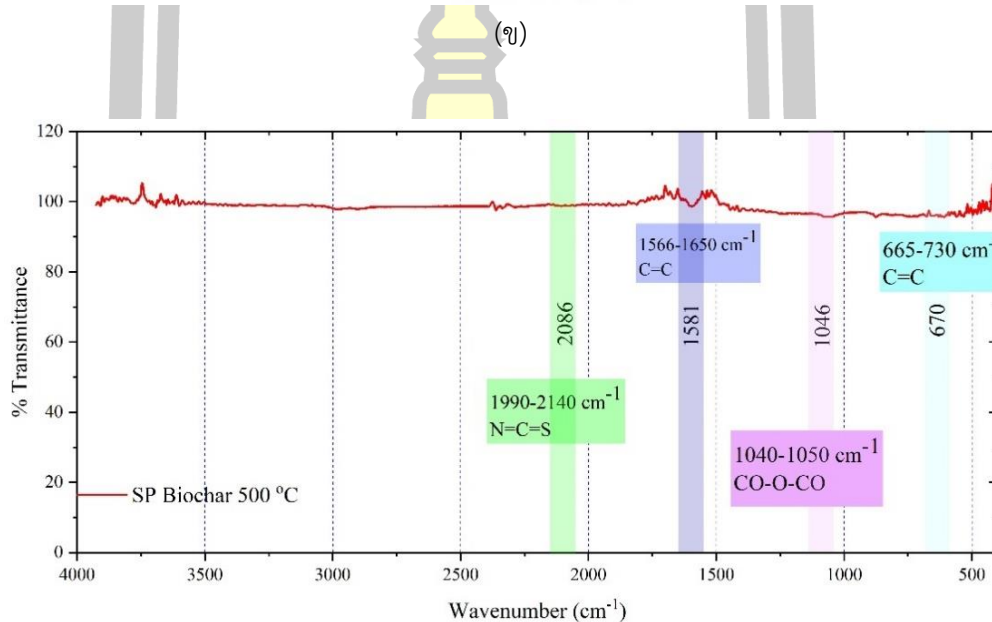
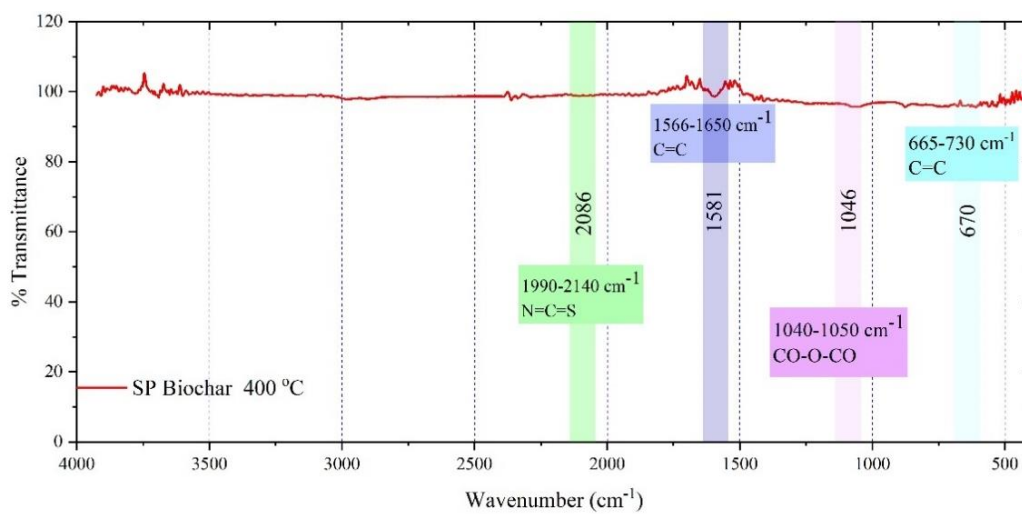
FTIR จะมีจุดที่เป็นฟังก์ชันจากภาพประกอบที่ 19 FTIR สำหรับไบโอชาร์มีจุดที่เป็นฟังก์ชัน 4 จุด ตำแหน่งความสูง 2086 ตั้งอยู่ระหว่าง $1990-2140\text{ cm}^{-1}$ เป็นฟังก์ชัน ($\text{N}=\text{C}=\text{S}$ stretching) ในชนิดของไอโซไทโอไซเอต (isothiocyanate) ตำแหน่งความสูง 1581 ตั้งอยู่ระหว่าง $1566-1650\text{ cm}^{-1}$ เป็นฟังก์ชัน ($\text{C}=\text{C}$ stretching) ในชนิดของอัลลีน (allene) ตำแหน่งความสูง 1046 ตั้งอยู่ระหว่าง $1040-1050\text{ cm}^{-1}$ เป็นฟังก์ชัน ($\text{CO}-\text{O}-\text{CO}$ stretching) ในชนิดของแอนไฮไดรด์ (anhydride) ตำแหน่งความสูง 670 ตั้งอยู่ระหว่าง $665-730\text{ cm}^{-1}$ เป็นฟังก์ชัน ($\text{C}=\text{C}$ bending) ในชนิดของอัลคีน (alkene) จากจุดพีคของขี้เลื่อยแสดงให้เห็นว่ามีกลุ่มของฟังก์ชันของอีเทอร์และของอีเทอร์ไนไตรล ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะที่อยู่ภายในขี้เลื่อย [42] จุดพีคที่เกิดขึ้นในกราฟ FTIR ของพลาสติกบอกถึง

กลุ่มฟังก์ชันของอัลเคน และของอัลดีไฮด์ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะที่อยู่ภายในพลาสติก [43] และกลุ่มฟังก์ชันที่เกิดขึ้นของ SP Biochar ที่เตรียมได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C สามารถบอกถึงลักษณะของกลุ่มฟังก์ชันที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ กลุ่มฟังก์ชันไอโซโทไฮเอต อัลลีน แอนไฮดรายด์ และอัลคีน ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจฟังก์ชันของแต่ละตำแหน่งในสเปกตรัม FTIR สำหรับ SP Biochar ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โลหะหนักในน้ำเสีย การประยุกต์ใช้ถ่านในการดูดซับน้ำเสียเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการทำให้น้ำเสียดูดซับออกจากสิ่งแวดล้อม ถ่านมักจะมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดีเนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวมาก และหมู่ฟังก์ชันที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งช่วยให้สามารถดูดซับสารเหล่านั้นได้มากขึ้น การใช้ถ่านชาร์ในการดูดซับน้ำเสียสามารถนำมาใช้ในหลาย เช่น ในการดูดซับน้ำเสียในอุตสาหกรรม เรือรบ โรงงานอาหาร หรือที่ที่มีการสร้างน้ำเสีย ดังนั้นการนำถ่านชาร์มาใช้ในการกระบวนการดูดซับน้ำเสียช่วยลดการปล่อยสารพิษออกมาจากน้ำเสีย ทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียได้สะอาดขึ้น และลดมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ได้



(ก)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

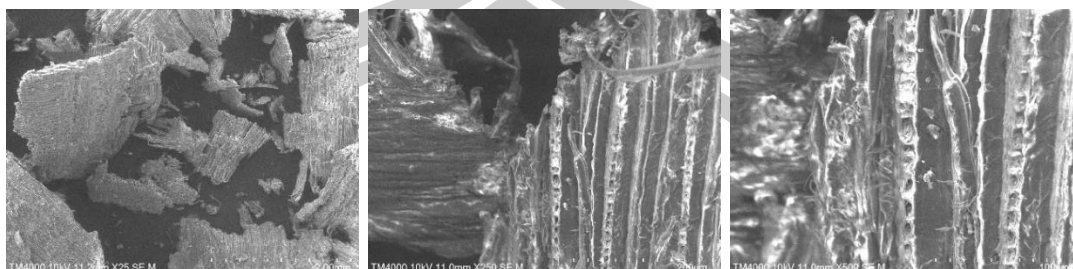


ภาพประกอบ 19 FTIR ของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C

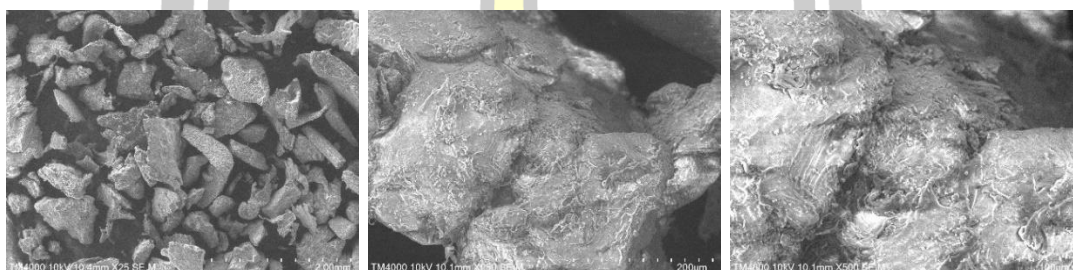
4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซีลี้อยู่ก่อนการเผาแสดงในภาพประกอบที่ 20 (ก) แสดงให้เห็นว่าซีลี้อยู่มีลักษณะพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ผิวไม่มัน มีรูพรุนน้อยและรอยแตกของเนื้อเยื่อเหมือนรังผึ้งลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพลาสติกก่อนการเผาแสดงในภาพประกอบที่ 20 (ข) ลักษณะทาง

สัณฐานวิทยาของพลาสติกก่อนการเผา มีพื้นผิวที่เรียบ ผิวมันวาว ไม่มีรูพรุนและมีรูปทรงเหมือนกัน



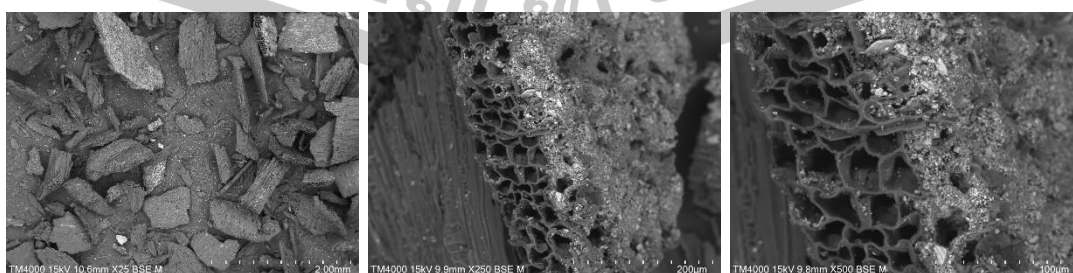
(ก)



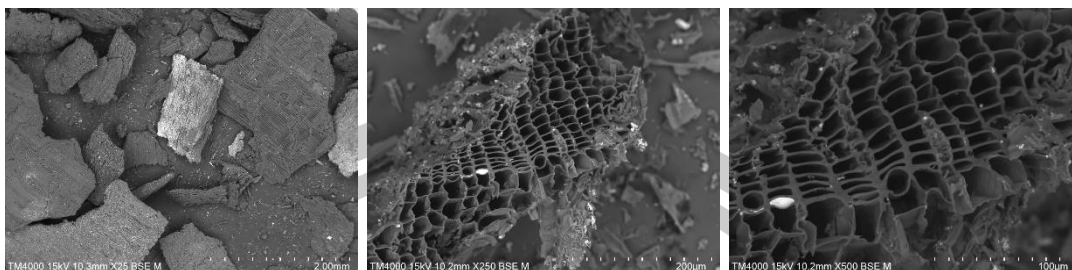
(ข)

ภาพประกอบ 20 SEM-EDX ของวัสดุที่ใช้ดูดซับ (ก) ซี้เลื่อย (ข) พลาสติก

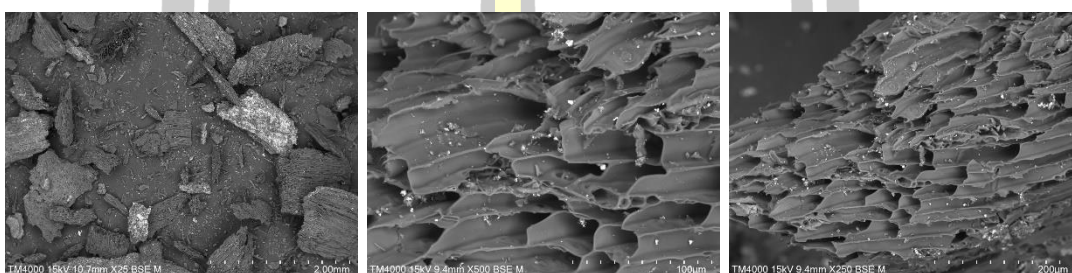
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ SP Biochar ที่มี SEM แสดงในภาพประกอบที่ 21 แสดงให้เห็นว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C พบว่าช่วงอุณหภูมิ 300 และ 400 °C ที่กำลังขยาย 25, 250 และ 500 นาโนเมตร วิเคราะห์พื้นผิวลักษณะทางกายภาพว่ามีลักษณะมีความไม่เรียบ ผิวมันเงาคล้ายรังผึ้ง มีรูพรุนขนาดต่างๆ ซึ่งทั้ง 2 อุณหภูมินี้มีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ในลักษณะทางกายภาพที่อุณหภูมิ 500 °C มีรูปร่างคล้ายผลึกคริสตัล ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์พลาสติกซีเลื่อยซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก 80-90 % และองค์ประกอบอื่นๆ เป็นองค์ประกอบรองที่มีปริมาณ ความพรุน และพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากการเผา SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C จะแตกต่างกัน



(ก)



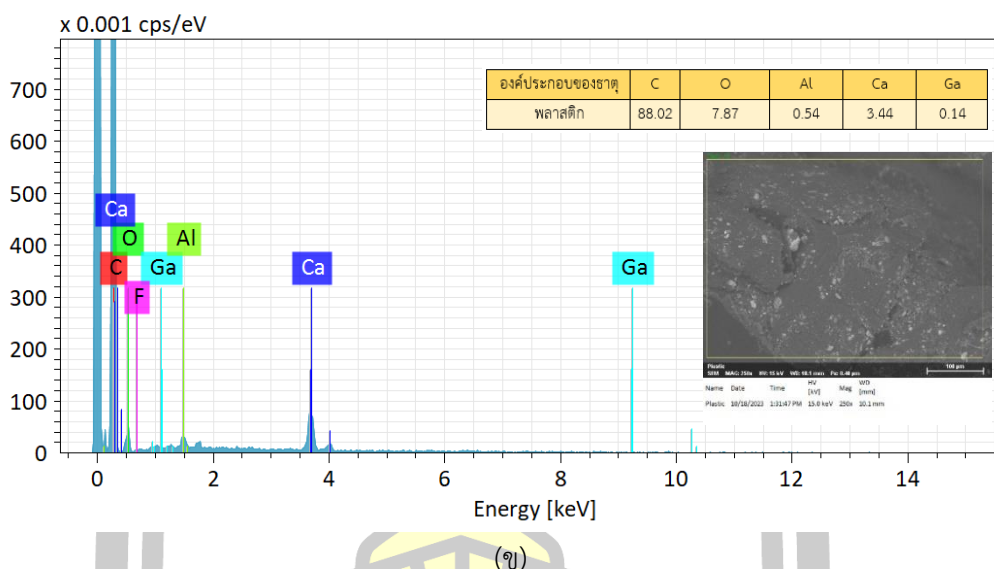
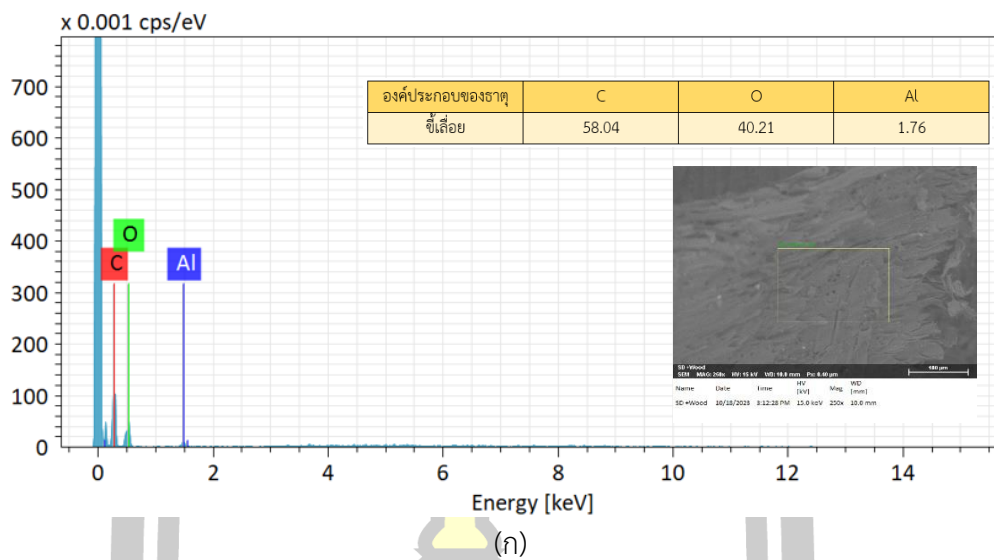
(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 21 SEM-EDXของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C, (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C

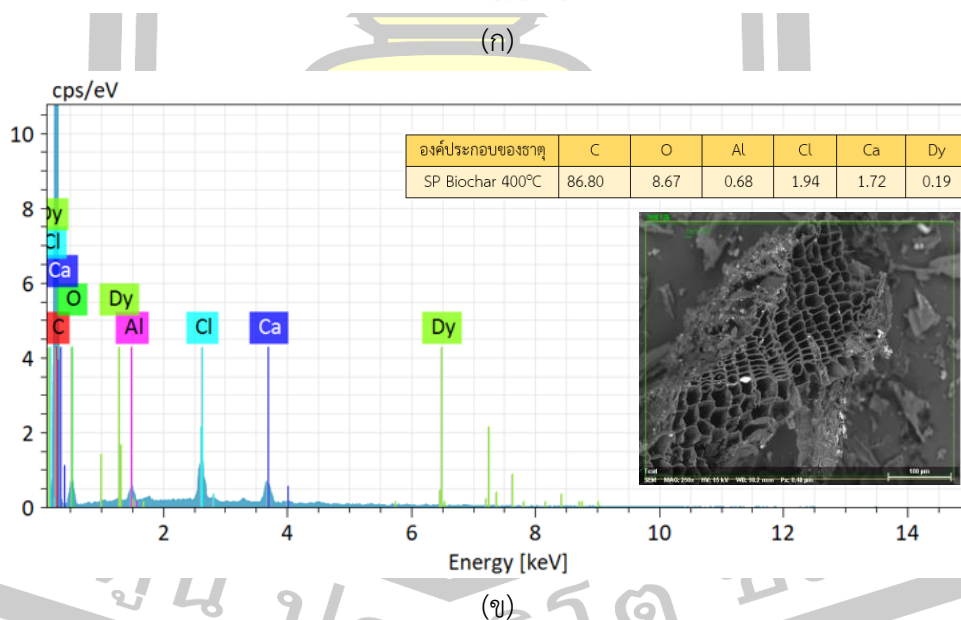
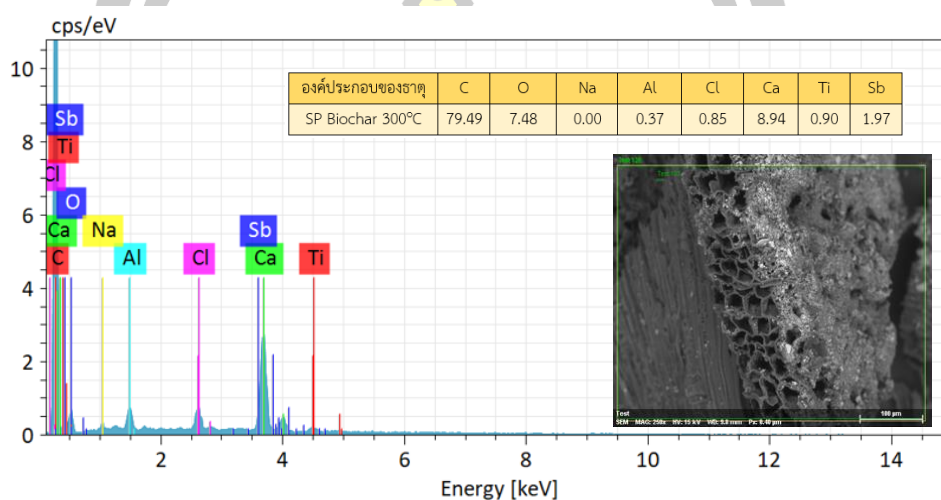
การศึกษาองค์ประกอบของธาตุด้วย EDX จากภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่สแกนและสเปกตรัมรังสี X-ray ที่กระจายพลังงานแสดงดังภาพประกอบที่ 22 (ก) ขี้เลื่อยที่ยังไม่ผ่านการเผา มีองค์ประกอบของธาตุภายในขี้เลื่อยดังนี้ C=58.04% ,O=40.21% และ Al=1.76 และ พลาสติกที่ยังไม่ผ่านการเผา มีองค์ประกอบของธาตุภายในพลาสติก C=88.02% ,O=7.87% ,Al=0.54% และ Ca=3.44% แสดงให้เห็นว่า โพลีโพรพิลีน (PP) เป็นพลาสติกที่ประกอบด้วยธาตุหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) โครงสร้างทางเคมีของโพลีโพรพิลีนประกอบด้วยหน่วยโมโนเมอร์โพรพิลีน (หรือโพรพีน) ซึ่งมีสูตรเคมีคือ $(C_3H_6)_n$ โดยตัว "n" แทนจำนวนหน่วยโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อกันในโซ่ยาวเพื่อสร้างโพลีโพรพิลีน ดังนั้นองค์ประกอบหลักของโพลีโพรพิลีน (PP) คือธาตุคาร์บอนซึ่งเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนในพลาสติกจึงมากกว่าขี้เลื่อย

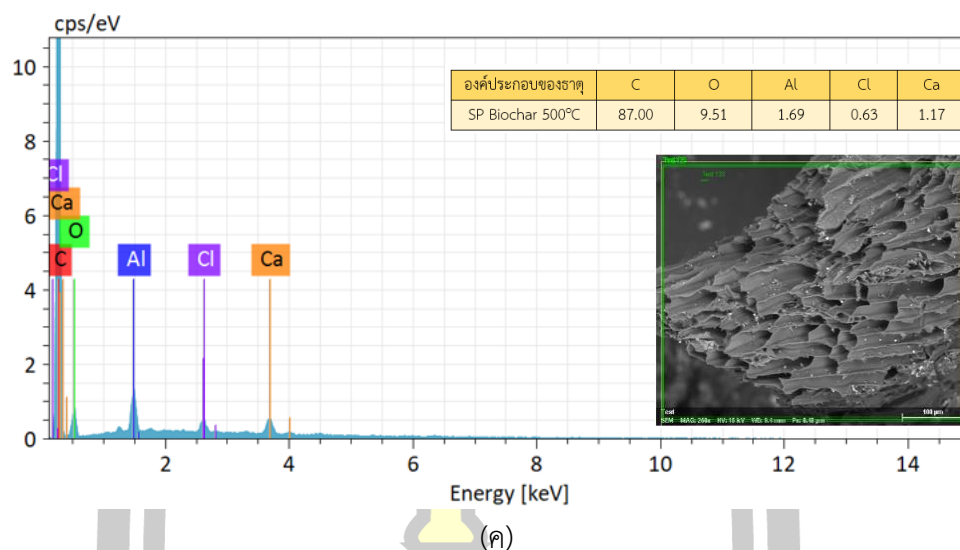


ภาพประกอบ 22 องค์ประกอบของธาตุ (ก) ชี้เลื่อย (ข) พลาสติก PP

ภาพประกอบที่ 23 (ก) แสดงองค์ประกอบของธาตุ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar มี C=79.49% ,O =7.48% และ Ca= 8.94% ภาพประกอบที่ 23 (ข) ที่อุณหภูมิ 400 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C= 86.80% ,O=8.67% ,Cl= 1.94% และ Ca= 1.72% c) และ ภาพประกอบที่ 23 (ค) ที่อุณหภูมิ 500 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=87.00% ,O=8.51% ,Al=1.69% และ Ca=1.17% ในแต่ละอุณหภูมิ องค์ประกอบ C สูงสุดคือ จะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอน ของSP Biochar 300 °C = 79.49 %, SP Biochar 400 °C = 86.80% และ SP Biochar 500 °C = 87.00% ซึ่งสูงขึ้นตามลำดับการเพิ่มอุณหภูมิการเผาปริมาณธาตุที่อยู่ภายใน SP Biochar มีองค์ประกอบของออกซิเจน

(O) แคลเซียม (Ca) และอลูมิเนียม (Al) อยู่เล็กน้อย ซึ่งปริมาณธาตุส่วนใหญ่ที่พบมากที่สุด ใน SP Biochar คือ องค์ประกอบของคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของถ่าน SP Biochar แสดงให้เห็นว่าถ่าน SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงที่สุด แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของธาตุอื่นปนเปื้อนอยู่ เพียงแต่ปริมาณของธาตุจะแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิในการเผาหรือไพโรไลซิส





ภาพประกอบ 23 องค์ประกอบของธาตุ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข)
SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C

4.4 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Brunauer Emmett Teller (BET)

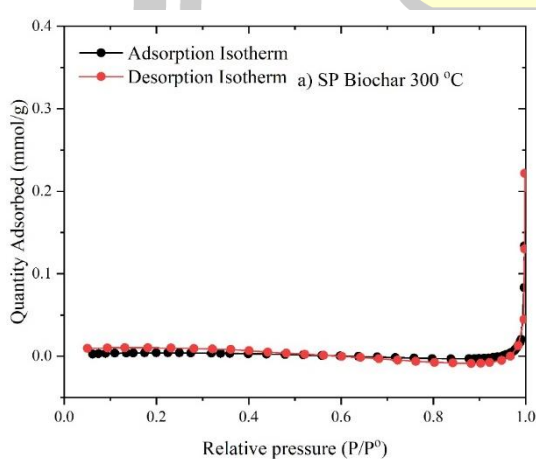
ในการวิเคราะห์ BET จะมีการป้อนก๊าซดูดซับในปริมาณที่ทราบ ซึ่งโดยทั่วไปคือไนโตรเจน (N_2) ให้กับตัวอย่างที่มีความดันสัมพัทธ์ต่างกัน โมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุ และวัดปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับ โดยการวางแผนปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับเทียบกับความดันสัมพัทธ์ จะได้ไอโซเทอมประเภทเฉพาะที่เรียกว่า BET ไอโซเทอม ไอโซเทอม BET สามารถประมาณค่าได้เพื่อกำหนดปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ใกล้กับศูนย์ ค่านี้แสดงถึงความสามารถในการดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อทราบพื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลก๊าซดูดซับ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ BET พื้นที่ผิวจำเพาะที่คำนวณโดยใช้วิธี BET มักแสดงเป็นหน่วยตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่ผิวภายนอกและภายในของวัสดุ และสามารถใช้ในการเปรียบเทียบวัสดุต่างๆ หรือประเมินผลของการบำบัดหรือการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวต่างๆ

ผลลัพธ์จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ 500 °C มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดที่ $0.6656 m^2/g$ และน้อยที่สุดที่ 300 °C คือ $0.3020 m^2/g$ ปริมาตรรูพรุนสูงสุดที่ 500 °C คือ $0.004851 m^3/g$ และปริมาตรรูพรุนน้อยที่สุดที่ 300 °C คือ $0.001818 m^3/g$ และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยสูงสุดที่ 500 และ 400 °C คือ 56.0534 nm แต่ที่อุณหภูมิ 300 °C เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยจะเท่ากับ 24.075 nm ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มสูงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน โดยทั้งหมดสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นและเวลาในการทดลองนานขึ้น

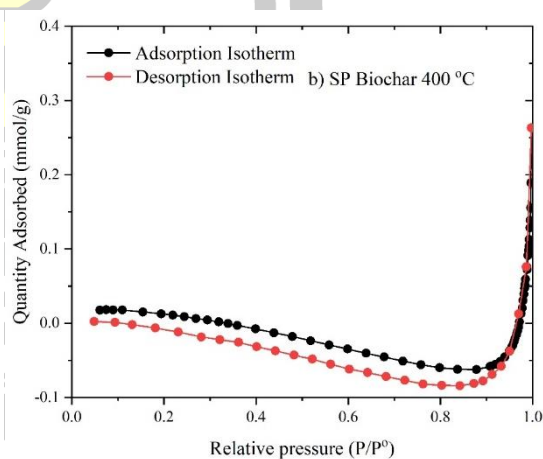
ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของ SP Biochar

อุณหภูมิ	SP Biochar 300 °C	SP Biochar 400 °C	SP Biochar 500 °C
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	0.3020	0.3462	0.6656
ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (m^3/g)	0.001818	0.004006	0.004851
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)	24.075	56.0534	56.0534

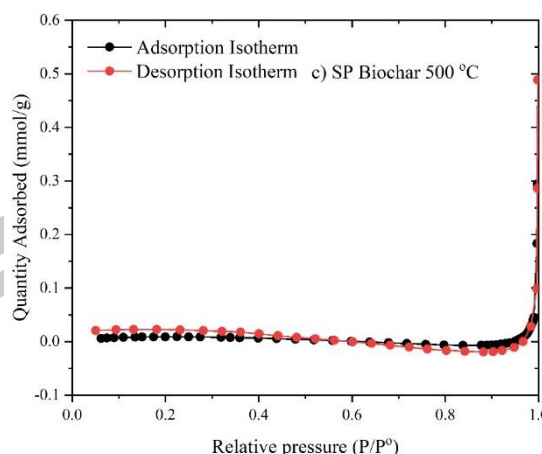
คุณลักษณะของไอโซเทอมของถ่าน SP Biochar ที่เตรียมได้ จากภาพประกอบที่ 24 สังเกตได้คือไอโซเทอมมีลักษณะการดูดซับประเภทที่สาม (Type III) โดยมีลักษณะการดูดซับแบบการก่อตัวของชั้นเดียว สองชั้น สองชั้น และชั้นอื่นๆ เกิดขึ้นพร้อมกัน (multilayer) ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเกือบเท่าทวีคูณ ลักษณะการดูดซับประเภทที่สาม (Type III) เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดหมุน คือการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุนและของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นหลัก แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับที่อ่อนแอทำให้ตัวดูดซับน้อยลง ชั้นของการดูดซับเฉพาะที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อการดูดซับหลายชั้นเกิดขึ้น แรงดึงดูดระหว่างการดูดซับ แผ่นบุรอนที่อยู่รวมกันทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์สูง จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับชั้นแรก จะสมบูรณ์ในประเภทที่สาม (Type III) จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับมากกว่าแบบทประเภทที่สอง (Type II) [42]



(ก)



(ข)

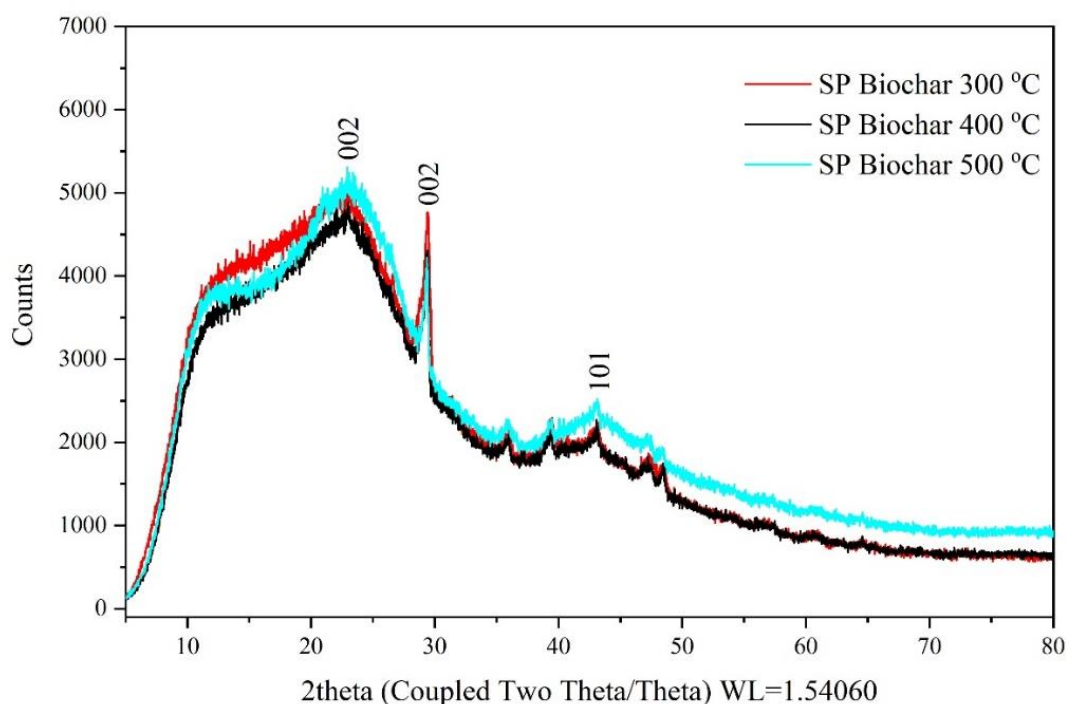


(ค)

ภาพประกอบ 24 ไอโซเทอมของ SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการเตรียมแบบไพโรไลซิสแบบช้า

4.5 ลักษณะทางกายภาพของ X-Ray Diffraction (XRD)

เป็นเทคนิคทางกายภาพที่ใช้รังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาโครงสร้างของวัสดุที่เรียกว่าคริสตัล (crystals) หรือวัสดุที่มีการเรียงโมเลกุลอย่างเรียบเรียง โดยการตรวจวัดการกระจายของรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านหรือถูกสะท้อนจากสารตัวอย่างนั้นๆ การใช้ XRD นอกจากการศึกษาโครงสร้างของคริสตัลแล้วยังมีการนำไปใช้ในหลายงานเช่น วิจัยวัสดุ การควบคุมคุณภาพวัสดุ การวิเคราะห์และการพิสูจน์ความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่าง [43] การศึกษาการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของวัสดุที่เกิดขึ้นจากตัวปรับเปลี่ยน (doping) หรือการได้รับกระแสไอเล็กทรอนิกส์ และการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพในลักษณะของคลื่นเสียง XRD ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ SP Biochar โดยการวัดความเข้มของรังสี สะท้อนออกมาในมุมต่างๆ ภาพประกอบที่ 25 แสดงทั้งสามรายการ จะเห็นได้มุมตกกระทบที่ 22.91° , 29.46° และ 43.11° สำหรับ SP Biochar ที่ 300 4000 และ 500 °C ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการสะท้อนของระนาบที่ (002) และ (101) ซึ่งแสดงถึงลักษณะของรูปหกเหลี่ยมระยะสั้น มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ การจัดตำแหน่งของคาร์บอนชั้นใน SP Biochar ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับแกรไฟต์ซึ่งมีการเลี้ยวเบนของมุมตกกระทบที่ (d002 และ d101) ที่จากการคำนวณสมการแบรกก์ แสดงว่า SP Biochar บ่งบอกได้ว่าถ่าน SP Biochar ที่เตรียมได้มีคุณลักษณะเป็นถ่านชาร์ตามที่ตั้งสมมติฐานไว้เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่พบมีลักษณะคล้ายกราไฟท์เป็นองค์ประกอบหลัก



ภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึก SP Biochar ด้วยวิธี XRD

4.6 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี (CHNS)

จากผลการศึกษาลักษณะทางเคมีของ SP Biochar ของ CHNS พบว่าผลการทดสอบของ อุณหภูมิ 300 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=82.332% , H=3.199% , N=0.158 และ S=0.003% ที่อุณหภูมิ 400 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=82.298% , H=2.949% , N=0.109 และ S=0.003% และอุณหภูมิ 500 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=84.433% , H=1.905% , N=0.120 และ S =N.D. จากคำอธิบายข้างต้นบ่งชี้ว่าทุก อุณหภูมิมีค่า C มากกว่า 80% ค่า H ในทุกอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1.905% ค่า N ในทุกอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 0.109% และ ค่า S ในอุณหภูมิที่ 300 และ 400 °C มีค่าเท่ากัน แต่ในอุณหภูมิที่ 500 °C ตรวจสอบไม่พบค่าซัลเฟอร์ จากตารางที่ 3 พบว่าถ่าน SP Biochar มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงสุด ที่อุณหภูมิ 500 °C มีปริมาณของคาร์บอนที่ 84% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX) ส่วนองค์ประกอบของธาตุ ในทางกลับกันที่อุณหภูมิที่ 300 และ 400 °C มีปริมาณของธาตุไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์จะมีปริมาณใกล้เคียงกันไม่ต่างกันมาก จึงสรุปได้

ว่าถ่าน SP Biochar มีปริมาณคาร์บอนเกิดขึ้นมากที่สุดเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิที่สูงมีผลต่อลักษณะทางเคมีของถ่าน ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิในการเผาปริมาณของคาร์บอนในถ่านก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของถ่าน SP Biochar

วัสดุตัวดูดซับ	คาร์บอน (C) (% Wt)	ไฮโดรเจน (H) (% Wt)	ไนโตรเจน (N) (% Wt)	ซัลเฟอ (S) (% Wt)
SP Biochar 300°C	82.332	3.199	0.158	0.003
SP Biochar 400°C	82.298	2.949	0.120	0.003
SP Biochar 500°C	84.433	1.905	0.109	N.D.

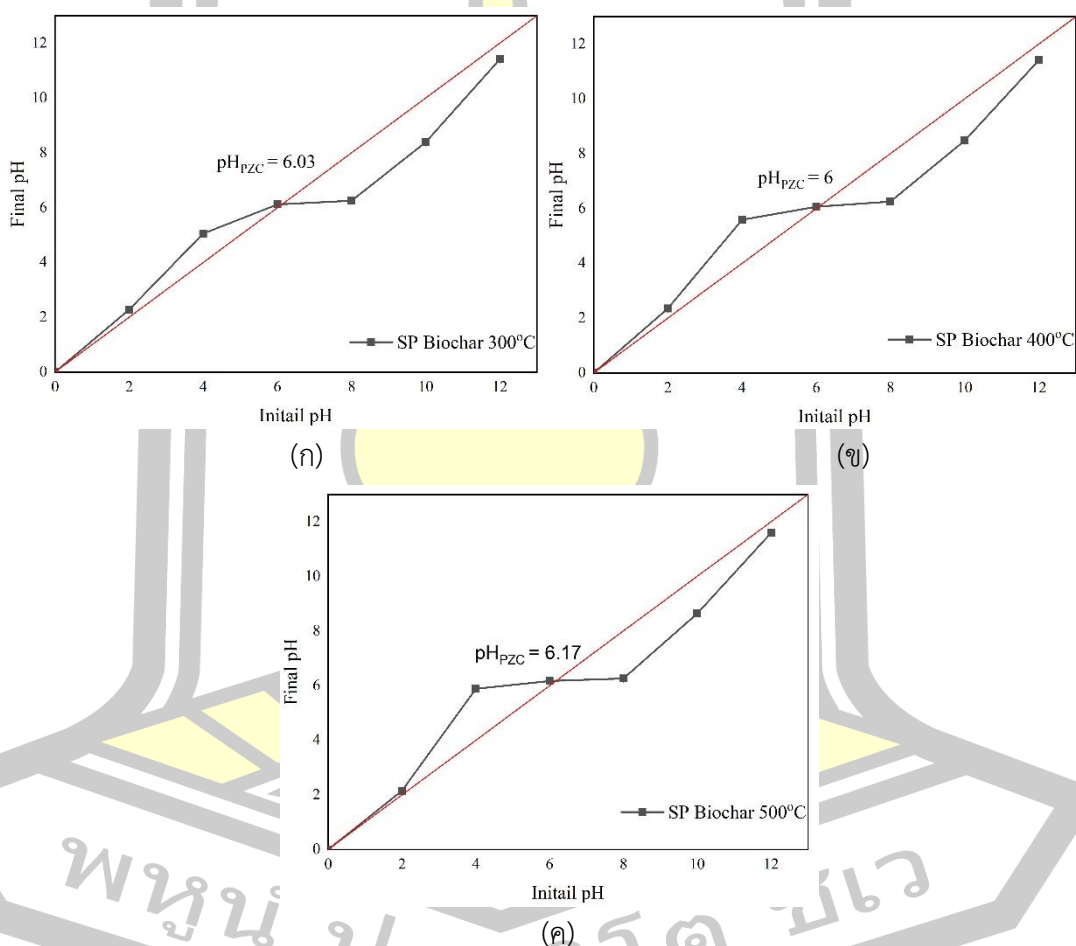
หมายเหตุ : N.D. = Not Detected

4.7 ผลการศึกษาค่า point of zero charge (pH_{pzc})

จากผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทจากค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้เครื่องวัด pH meter วัดค่า pH เริ่มต้นและวัดค่า pH ที่เปลี่ยนไปพบว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.03 ซึ่ง SP Biochar บ่งบอกได้ว่าค่าที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลางคือ 6.03 หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับหากค่า $pH < pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $pH > pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ สรุปได้ว่าประจุที่ผิว SP Biochar เป็นบวกที่เมื่อ pH_{pzc} 6.03 > pH ประจุที่ผิว SP Biochar เป็นลบที่เมื่อ pH_{pzc} 6.03 < pH สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้ดีในน้ำที่เป็นกรดแสดงดังภาพประกอบที่ 26 (ก)

จากผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทจากค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้เครื่องวัด pH meter วัดค่า pH เริ่มต้นและวัดค่า pH ที่เปลี่ยนไปพบว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 400 °C พบว่า pH_{pzc} เท่ากับ 6 ซึ่ง SP Biochar บ่งบอกได้ว่าค่าที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลางคือ 6 หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับหากค่า $pH < pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $pH > pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ สรุปได้ว่าประจุที่ผิว SP Biochar เป็นบวกที่เมื่อ pH_{pzc} 6 > pH ประจุที่ผิว SP Biochar เป็นลบที่เมื่อ pH_{pzc} 6 < pH สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้ดีในน้ำที่เป็นกรดแสดงดังภาพประกอบที่ 26 (ข)

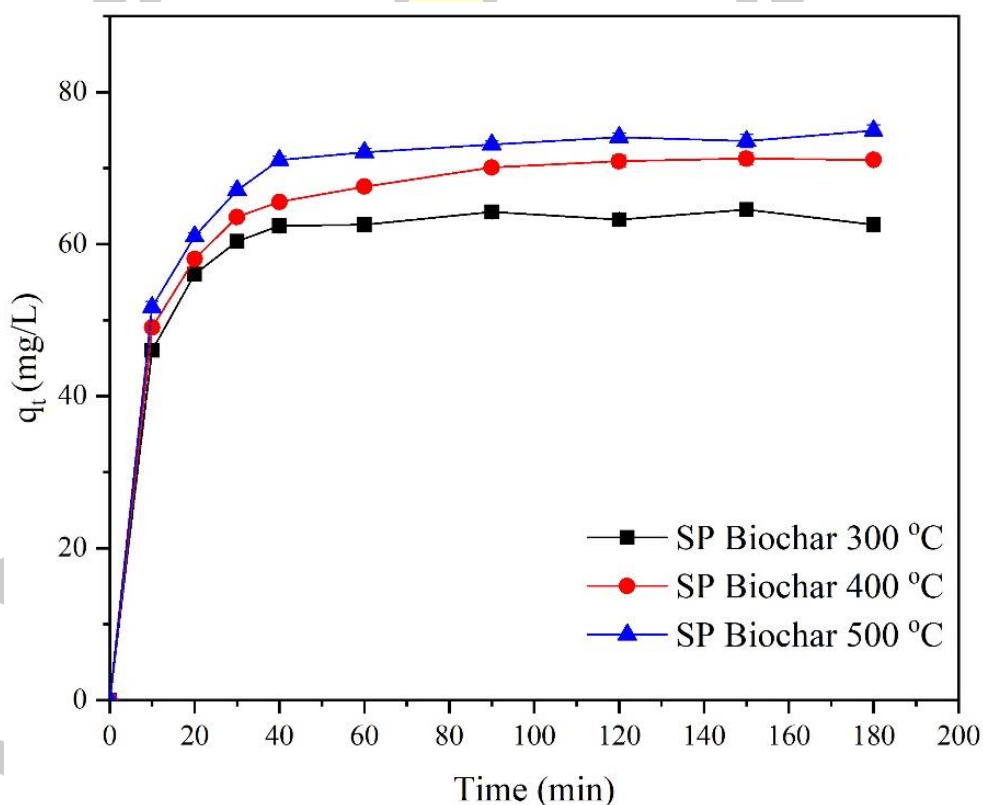
จากผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทจากค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้เครื่องวัด pH meter วัดค่า pH เริ่มต้นและวัดค่า pH ที่เปลี่ยนไปพบว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C พบว่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.17 ซึ่ง SP Biochar บ่งบอกได้ว่าค่าที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลางคือ 6.17 หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับหากค่า $pH < pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $pH > pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ สรุปได้ว่าประจุที่ผิว SP Biochar เป็นบวกที่เมื่อ pH_{pzc} 6.17 > pH ประจุที่ผิว SP Biochar เป็นลบที่เมื่อ pH_{pzc} 6.17 < pH สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้ดี ในน้ำที่เป็นกรดแสดงดังภาพประกอบที่ 26 (ค)



ภาพประกอบ 26 point of zero charge (pH_{pzc}) ของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C (ค) SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C

4.8 ผลการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

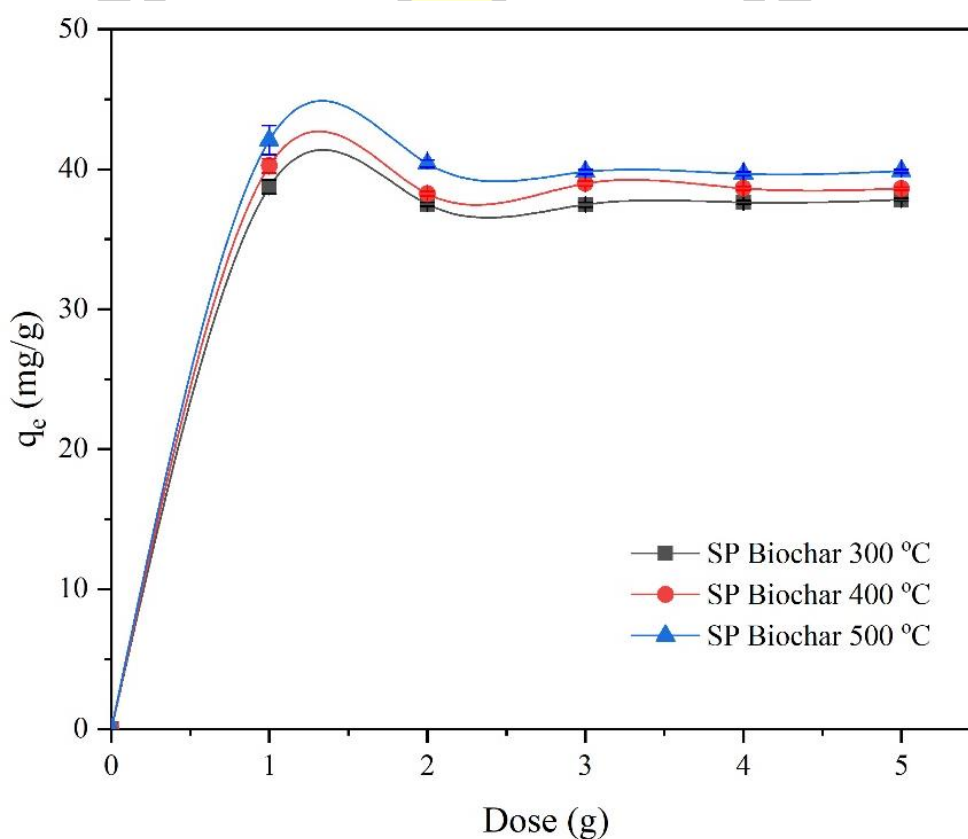
จากภาพประที่ 27 ระยะเวลาในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทจากระยะเวลาที่ 0-180 นาที พบว่าอัตราการดูดซับช่วงเวลาที่ 0-60 นาที มีความสามารถในการดูดซับสูงมากที่อุณหภูมิ 300 °C สามารถดูดซับได้ 62.5558 มิลลิกรัม/ลิตรหลังจากช่วงเวลาที่ 60-180 นาที ความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทเริ่มคงที่ อุณหภูมิ 400 °C สามารถดูดซับได้ 68.2369 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากช่วงเวลาที่ 80-180 นาที ความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทเริ่มคงที่ และ อุณหภูมิ 500 °C สามารถดูดซับได้ 71.9129 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากช่วงเวลาที่ 80-180 นาที ความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทเริ่มคงที่ จากผลการทดลองพบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิมีระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับคือ 60 นาที ซึ่งจะสามารถดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทได้ถึง 71 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพประกอบ 27 ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับของ SP Biochar

4.9 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

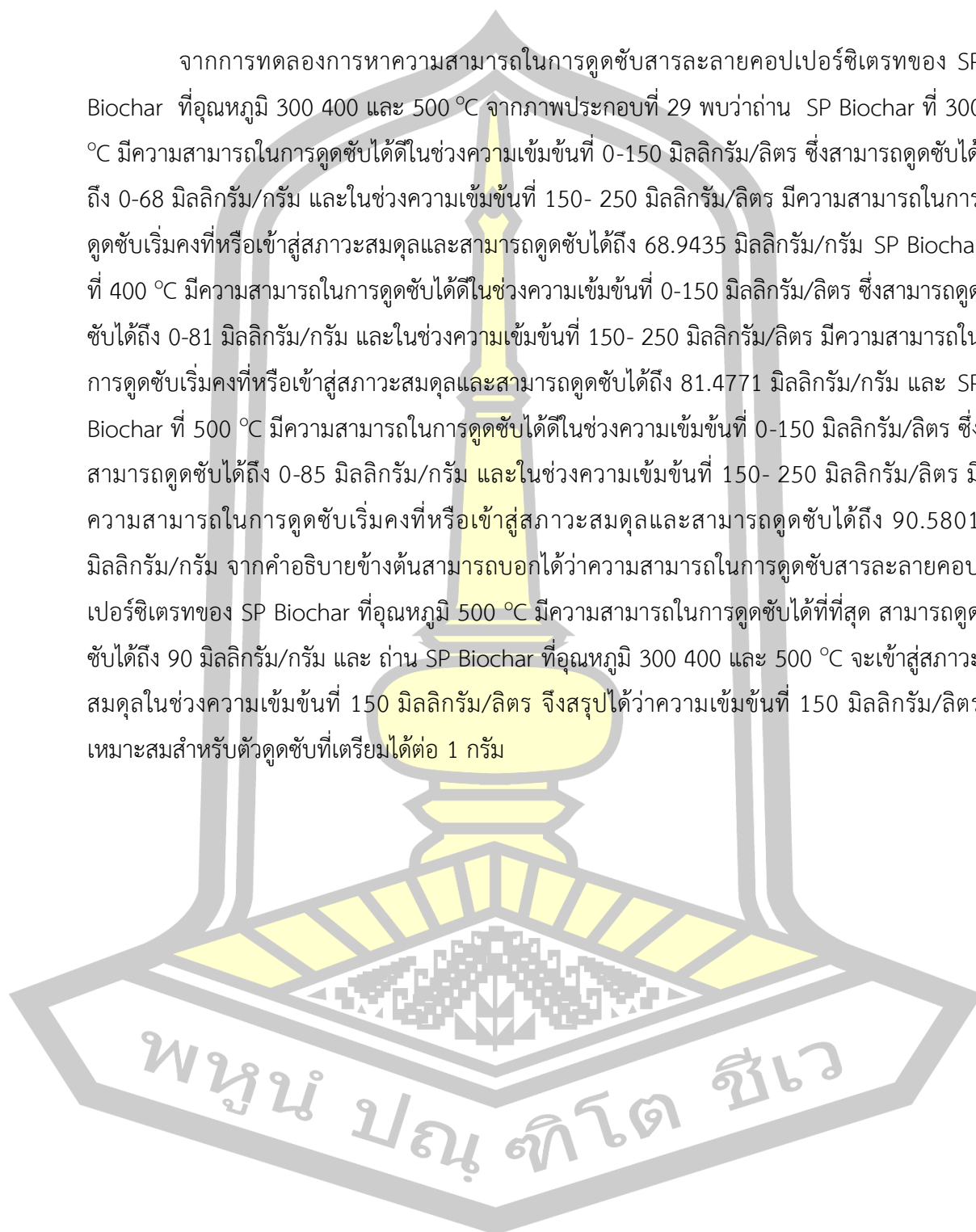
จากผลการทดลองผลของปริมาณถ่าน SP Biochar ที่เหมาะสมในการดูดซับ ณ อุณหภูมิที่ 300 400 และ 500 °C จากภาพประกอบที่ 28 อธิบายได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านที่ 0 , 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 กรัม พบว่าปริมาณตัวดูดซับในช่วงที่อุณหภูมิ 300 °C สามารถดูดซับได้ 38.7422 37.5003 37.4763 37.6313 และ 37.8246 มิลลิกรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 400 °C สามารถดูดซับได้ 40.2460 38.2522 38.9801 38.6339 และ 38.6267 และที่อุณหภูมิ 500 °C สามารถดูดซับได้ 41.7498 40.4244 39.8155 39.6782 และ 39.8631 มิลลิกรัม/กรัม หลังจากการอภิปรายข้างต้น จะเห็นได้ว่าถ่าน SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 มีความสามารถในการดูดซับดีที่สุด สามารถดูดซับได้ถึง 41.7498 มิลลิกรัม/กรัม และ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C พบว่าตัวดูดซับในปริมาณที่ 1 กรัม ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถสรุปได้ว่าถ่าน SP Biochar เหมาะสมกับตัวดูดซับในปริมาณ 1 กรัม สำหรับที่การดูดซับที่ความเข้มข้นที่ 100 มิลลิกรัม/ลิตร

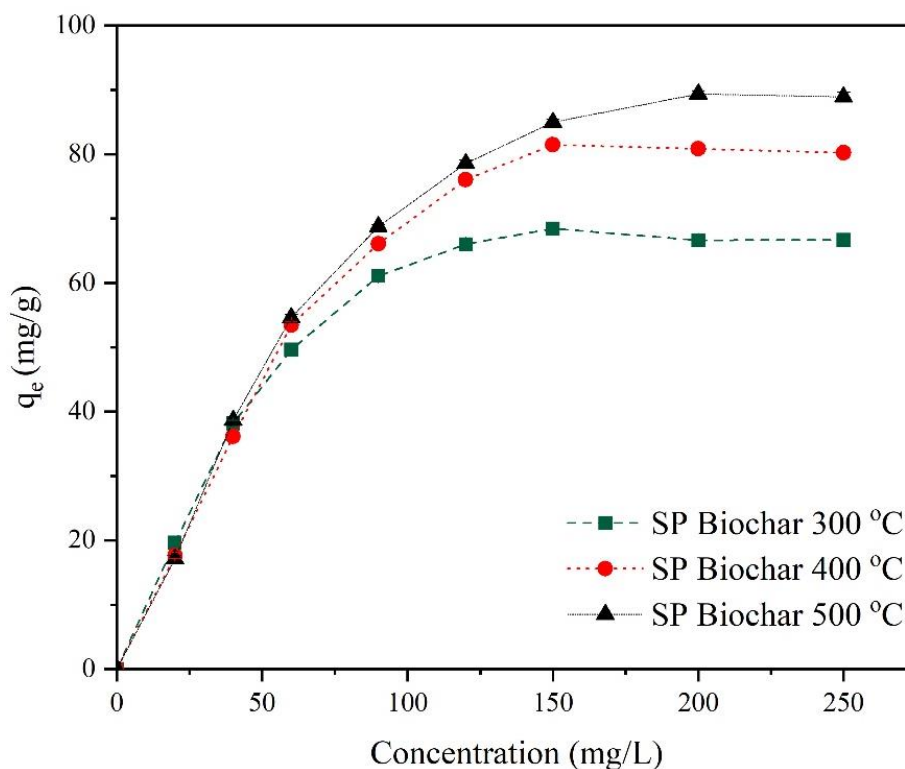


ภาพประกอบ 28 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงสังเคราะห์

4.10 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity)

จากการทดลองการหาความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C จากภาพประกอบที่ 29 พบว่าถ่าน SP Biochar ที่ 300 °C มีความสามารถในการดูดซับได้ดีในช่วงความเข้มข้นที่ 0-150 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสามารถดูดซับได้ถึง 0-68 มิลลิกรัม/กรัม และในช่วงความเข้มข้นที่ 150- 250 มิลลิกรัม/ลิตร มีความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลและสามารถดูดซับได้ถึง 68.9435 มิลลิกรัม/กรัม SP Biochar ที่ 400 °C มีความสามารถในการดูดซับได้ดีในช่วงความเข้มข้นที่ 0-150 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสามารถดูดซับได้ถึง 0-81 มิลลิกรัม/กรัม และในช่วงความเข้มข้นที่ 150- 250 มิลลิกรัม/ลิตร มีความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลและสามารถดูดซับได้ถึง 81.4771 มิลลิกรัม/กรัม และ SP Biochar ที่ 500 °C มีความสามารถในการดูดซับได้ดีในช่วงความเข้มข้นที่ 0-150 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสามารถดูดซับได้ถึง 0-85 มิลลิกรัม/กรัม และในช่วงความเข้มข้นที่ 150- 250 มิลลิกรัม/ลิตร มีความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลและสามารถดูดซับได้ถึง 90.5801 มิลลิกรัม/กรัม จากคำอธิบายข้างต้นสามารถบอกได้ว่าความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีความสามารถในการดูดซับได้ที่ดีที่สุด สามารถดูดซับได้ถึง 90 มิลลิกรัม/กรัม และ ถ่าน SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C จะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงความเข้มข้นที่ 150 มิลลิกรัม/ลิตร จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่ 150 มิลลิกรัม/ลิตร เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับที่เตรียมได้ต่อ 1 กรัม





ภาพประกอบ 29 ความสามารถในการดูดซับของ SP Biochar

4.11 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic adsorption)

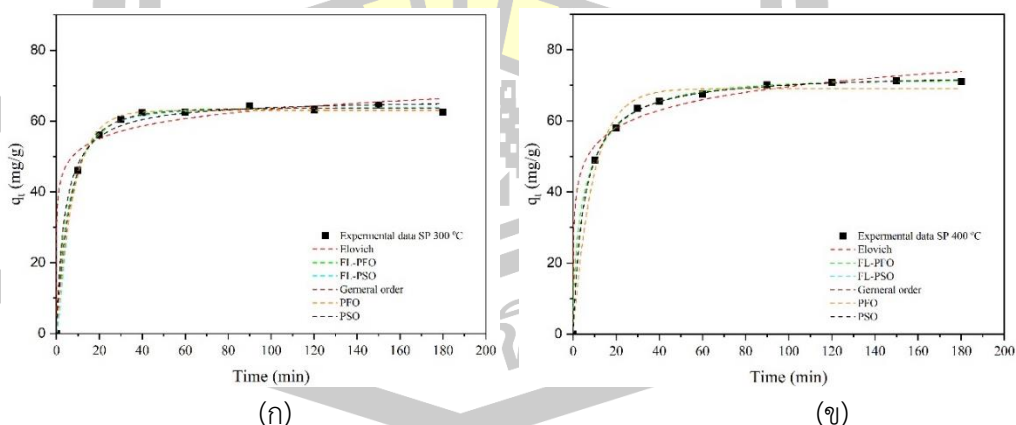
จากภาพประกอบที่ 30 (ก) จากผลการทดลองการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) โดยพิจารณาจาก ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจลนพลศาสตร์ของ SP Biochar พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่า R-adjusted squared เท่ากับ 0.9988 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.4685) Res. sum of squ. (3.2796) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่น จึงสรุปได้ว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 °C สอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 63.59542 มิลลิกรัมต่อกรัม

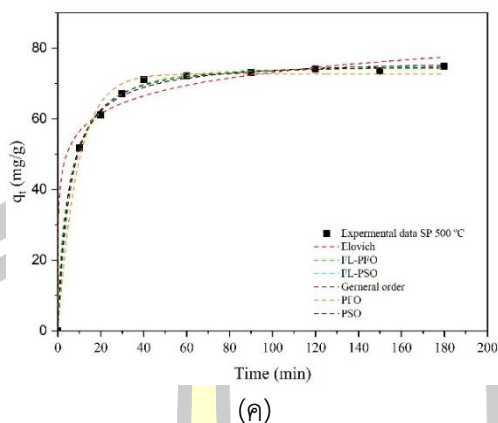
จากภาพประกอบที่ 30 (ข) จากผลการทดลองการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 400 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) โดยพิจารณาจาก ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจลนพลศาสตร์ของ SP Biochar พบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่า R-adjusted

squared เท่ากับ 0.9996 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.1626) Res. sum of squ. (1.1388) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่น จึงสรุปได้ว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 400 °C สอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 71.47313 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากภาพประกอบที่ 30 (ค) จากผลการทดลองการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) โดยพิจารณาจากตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจลนพลศาสตร์ของ SP Biochar พบว่าที่อุณหภูมิ 500 °C มีค่า R-adjusted squared เท่ากับ 0.9988 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.5993) Res. sum of squ. (4.1957) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่น จึงสรุปได้ว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C สอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 74.3233 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C จากภาพประกอบที่ 30 (ก ข และ ค) แสดงถึงแบบจำลองของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) [44] โดยพิจารณาจากค่า R^2 จากตารางที่ 4 โดยค่า R^2 ของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มีค่าเท่ากับ 0.99881 0.99966 และ 0.99886 เรียงตามลำดับ เป็นการดูดซับแบบถูกแบ่งออกเป็นชั้นที่มีขนาดต่างๆ และมีการดูดซับเกิดขึ้นอย่างเป็นบางส่วนในแต่ละชั้นนั้นๆ โดยที่แต่ละชั้นมีลักษณะการดูดซับที่คล้ายคลึงกัน แต่ขนาดของชั้นนั้นจะแตกต่างกันตามลักษณะของ SP Biochar [45]





ภาพประกอบ 30 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ SP Biochar (ก) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 300 °C (ข) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 500 °C

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจลนพลศาสตร์ของ SP Biochar

แบบจำลองไอโซเทอม	SP Biochar 300°C	SP Biochar 400°C	SP Biochar 500°C
Pseudo first order (PFO)			
q_e	63.0470	69.0766	72.7158
K_1	0.1236	0.1077	0.1090
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	1.2434	6.3318	5.0426
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	9.9471	50.6548	40.3414
R^2	0.9971	0.9881	0.9914
R^2_{adj}	0.9968	0.9866	0.9904
Pseudo second order (PSO)			
q_e	66.2887	73.6264	77.2317
K_2	0.0039	0.0026	0.0026
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	2.1222	0.1856	1.0661
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	16.9780	1.4847	8.5291
R^2	0.9952	0.9996	0.9982
R^2_{adj}	0.9946	0.9996	0.9979
General (rational) order			

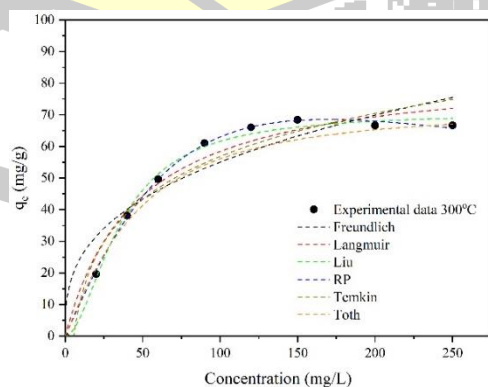
q_e	63.7251	73.3892	75.3589
K_r	0.0452	0.0031	0.0094
n	1.2948	1.9599	1.6674
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.5265	0.2080	0.8250
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	3.6860	1.4560	5.7756
R^2	0.99896	0.99966	0.99878
R^2_{adj}	0.99866	0.99956	0.99843
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)			
q_e	63.5954	71.4731	74.3233
K_1	0.2233	0.3259	0.2781
α	0.7587	0.5505	0.6247
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.4685	0.1626	0.5993
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	3.27962	1.1388	4.1957
R^2	0.9990	0.9997	0.9991
R^2_{adj}	0.9988	0.9996	0.9988
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)			
q_e	64.0911	73.5099	75.9063
K_2	8.8641	0.0026	0.0017
α	1.6451	1.0133	1.1840
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.6597	0.21051	0.90902
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	4.6179	1.4735	6.3631
R^2	0.9987	0.9996	0.9986
R^2_{adj}	0.9983	0.9995	0.9982
Elovich			
$\alpha_{(e)}$	11928.206	1046.1423	1670.7990
$\beta_{(e)}$	0.1951	0.1374	0.1372
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	9.6788	5.3601	8.8506
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	77.4310	42.8807	70.8050

R^2	0.9781	0.9899	0.9850
R^2_{adj}	0.9754	0.9887	0.9831

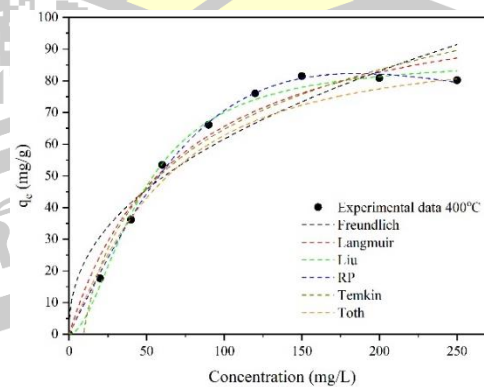
4.12 ผลการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption Isotherm)

จากผลการทดลองการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C จากภาพประกอบที่ 31 (ก และ ข) แสดงถึงแบบจำลองของแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลองของเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich – Peterson) โดยพิจารณาจากค่า R-adjusted squared (R^2) จากตารางที่ 5 โดยค่า R-adjusted squared (R^2) ของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C มีค่าเท่ากับ 0.9987 และ 0.9978 มีค่าที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$) (0.0018) (1.9475) Res. sum of squ. (4.6854) (11.6852) ตามลำดับ เป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานของแลงเมียร์และฟรอนดิสตั้งนั้นกลไกการดูดซับจึงเป็นการผสมผสานแบบจำลองนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้นเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรก [46]

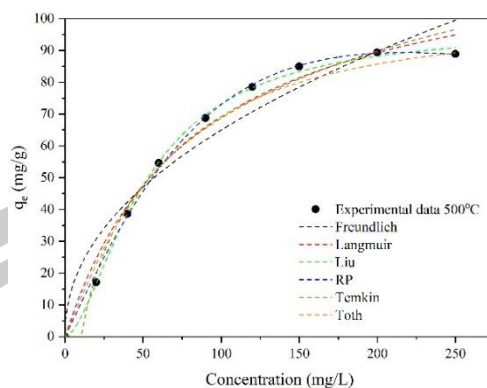
จากภาพประกอบที่ 31 (ค) แสดงถึงแบบจำลองของแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลองของหลิว (Liu) โดยพิจารณาจากค่า R-adjusted squared (R^2) จากตารางที่ 5 โดยค่า R-adjusted squared (R^2) ของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีค่าเท่ากับ 0.9985 มีค่าที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$) (1.5562) Res. sum of squ. (9.3377) และแสดงความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับ 97.3752 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นการผสมผสานระหว่างแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรอนดิสแต่เป็นสมมติฐานชั้นเดียวของแบบจำลองแลงเมียร์และคานันด์ [47]



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 31 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของ SP Biochar (ก) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 300 °C (ข) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 500 °C

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์การดูดซับไอโซเทอมของ SP Biochar

Model	SP Biochar 300°C	SP Biochar 400°C	SP Biochar 500°C
Freundlich			
k_f	11.2471	8.4844	7.6154
n_f	2.9004	2.3224	2.1481
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	56.0227	79.2382	67.7496
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	392.1589	554.6680	474.2472
R^2	0.9185	0.9245	0.9450
R^2_{adj}	0.9069	0.9137	0.9371
Langmuir			
q_m	85.4021	111.7436	126.1322
K_1	0.0216	0.0142	0.0121
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	18.4188	28.2073	19.4136
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	128.9322	197.4511	135.8956
R^2	0.9732	0.9731	0.9842
R^2_{adj}	0.9694	0.9692	0.9819
Temkin			

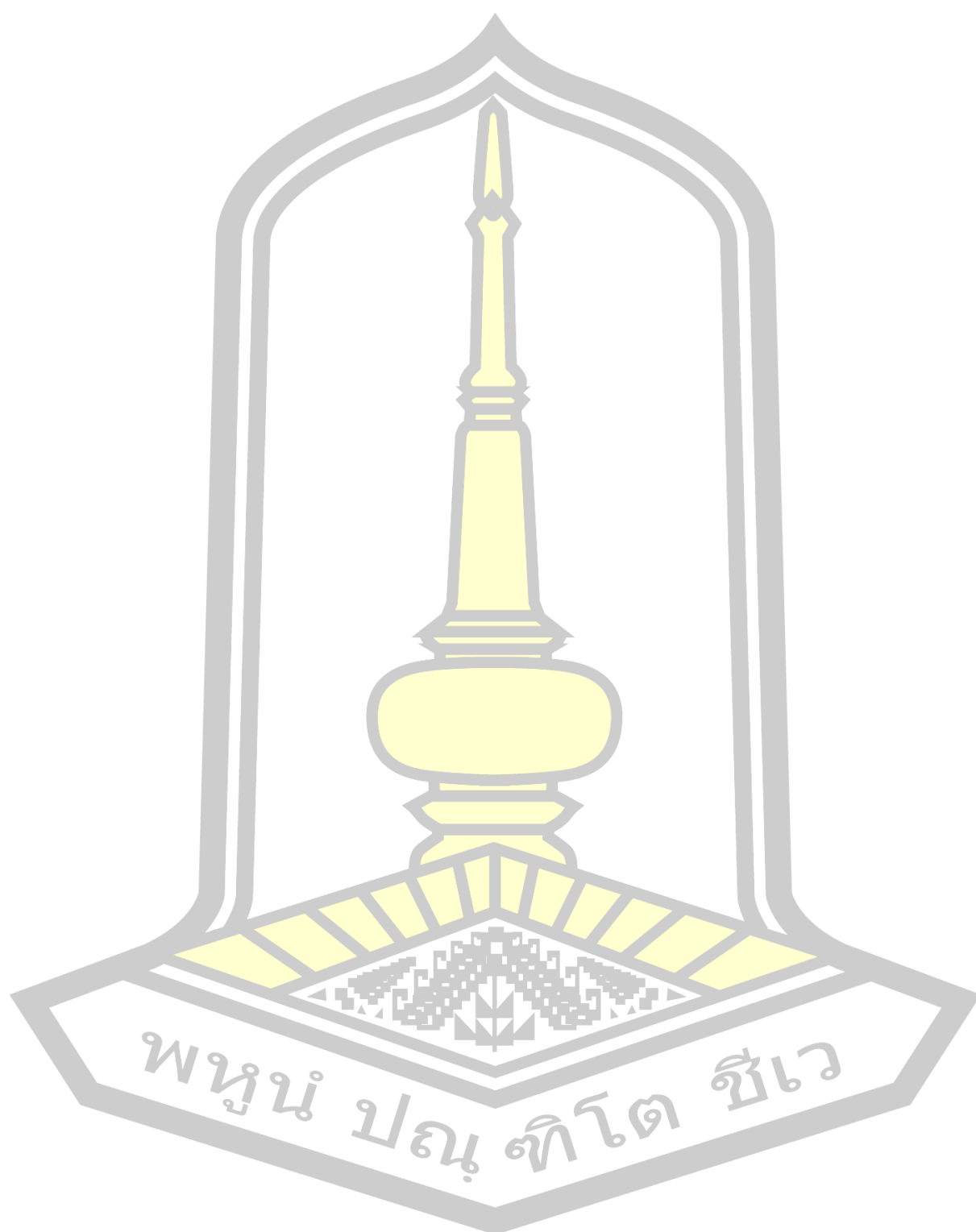
b_t	0.1812	0.1082	0.0955
k_t	19.6247	27.1621	30.4534
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	29.2557	218.6357	16.7666
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	204.7905	0.0139	117.3668
R^2	0.9574	0.9702	0.9863
R^2_{agj}	0.9514	0.9660	0.9844
Liu			
q_m	70.8324	86.8131	97.3752
k_g	0.0281	0.0217	0.0194
n_g	1.8352	5.6914	1.6661
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	3.8656	34.1484	1.5562
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	23.1939	0.0110	9.3377
R^2	0.9951	0.9953	0.9989
R^2_{agj}	0.9935	0.9938	0.9985
Toth			
q_m	70.0000	90.0782	100.0000
k_{th}	0.0388	0.0124	0.0122
n_{th}	1.0000	1.5000	1.5000
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	60.3406	40.9015	16.6955
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	362.0437	245.4090	100.1731
R^2	0.9248	0.9666	0.9883
R^2_{agj}	0.8997	0.9554	0.9845
Redlich - Peterson			
k_{rp}	1.1039	0.9904	1.0394
α_r	5.2101	9.5927	2.1130
b	0.780	1.8113	1.6513
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.0018	1.9475	2.3309
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	4.6854	11.6852	13.9855
R^2	0.9990	0.9984	0.9983
R^2_{agj}	0.9987	0.9978	0.9978

4.13 การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Thermodynamic adsorption)

จากผลการทดลองการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C จากตาราง 6 แสดงค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกการดูดซับของ SP Biochar ที่อุณหภูมิที่ 300 400 และ 500 °C พบว่าค่า ΔH° เท่ากับ 21.27 44.35 และ 60.33 (kJ mol^{-1}) ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะบอกถึงลักษณะการดูดซับที่เป็นการดูดซับแบบกายภาพ แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับเกิดขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยของอุณหภูมิ ค่า ΔS° เท่ากับ 0.15 0.23 และ 0.29 ($\text{kJ K}^{-1} \text{mol}^{-1}$) ตามลำดับ ถ้า ΔS° มีค่าเป็นบวกในส่วนของเทอร์โมไดนามิกการดูดซับนั้นหมายความว่ากระบวนการดูดซับทำให้ระบบมีความไม่เรียงระเบียบมากขึ้น หรือมีความสับสนมากขึ้นการดูดซับที่เกิดขึ้นได้นั้นส่งผลให้เอนโทรปี (entropy) เพิ่มขึ้น ทำให้ ΔS° มีค่าเป็นบวก และค่า ΔG° ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มีค่าระหว่าง -24.62 ถึง -31.19 (kJ mol^{-1}) ซึ่งหมายถึงกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ ยิ่งค่า ΔG° มีค่าติดลบเยอะยิ่งสามารถดูดซับได้ดี [48] สรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรท เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ตารางที่ 6 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับทองแดงด้วย SP Biochar

วัสดุตัวดูดซับ	อุณหภูมิ (K)	K_1 (L mg^{-1})	K_e	ΔG° (kJ mol^{-1})	ΔH° (kJ mol^{-1})	ΔS° ($\text{kJ K}^{-1} \text{mol}^{-1}$)
SP Biochar 300 °C	298	0.08616	20816	-24.62	21.27	0.15
	308	0.1117	26986	-26.16		
	318	0.1479	35732	-27.70		
SP Biochar 400 °C	298	0.11975	28931	-25.43	44.35	0.23
	308	0.20871	50424	-27.77		
	318	0.3694	89247	-30.11		
SP Biochar 500 °C	298	0.1077	26020	-25.43	60.33	0.29
	308	0.3211	77577	-28.31		
	318	0.4949	119567	-31.19		



บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากผลการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองการดูดซับสารละลายทองแดงของ SP Biochar ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C และทำการประยุกต์ใช้กระบวนการโซบโดยใช้ไน้เสียด้อย่างทองแดง การศึกษาในครั้งนี้ได้นำซีลี้อยที่เหลือทังจากโรงไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์และขยะพลาสติกเหลือทังจากกระบวนการผลิตพลาสติกรีไซเคิลที่ไม่สามารถไปขึ้นรูปหรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้แล้ว ในปัจจุบันการทิ้งขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อาจจะทำลายระบบนิเวศของสิ่งแวดล้อม เราจึงเห็นความสำคัญในการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่าน SP Biochar ก่อนและหลังเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) โดยใช้เครื่องมือศึกษาคือ Scanning electron microscopy -Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX), X-ray diffraction (XRD), Brunauer-Emmett-Teller (BET), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), และ CHNS นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทในรูปแบบสารละลายโดยใช้ถ่าน SP Biochar ที่เตรียมได้ ซึ่งขอบเขตการศึกษามีดังนี้ Point of zero charge (pH_{pzc}), ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ, ปริมาณตัวดูดซับ, ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity), แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption), แบบจำลองของไอโซเทอมการดูดซับ (Isotherm Adsorption), และ เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Thermodynamic Adsorption) โดยผลการศึกษามีผลได้ดังต่อไปนี้

5.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process)

ลักษณะทางกายภาพของซีลี้อยก่อนนำเข้ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ซีลี้อยมักมีรอยหยักที่สันในตัว เนื่องจากการตัดหรือเลื่อยของเครื่องมือ ลักษณะทางกายภาพของขยะพลาสติกเหลือทัง (PP) มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ รูปทรงหลากหลายแตกต่างกันไป มีหลายสี และเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาผสมกันแล้วเข้ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าพบว่าพลาสติกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาความร้อนได้ดี จึงทำให้ถ่านไบโอชาร์มีการเผาไหม้ได้ดีขึ้น ลักษณะ

ทางกายภาพของถ่านมีความมันวาว เพราะพลาสติกที่ละลายไปเข้าไปเกาะกับขี้เลื่อยมีน้ำหนักเบาลง เป็นผงๆ สามารถนำไปบดเพื่อไปศึกษาต่อได้

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของขี้เลื่อยก่อนการเผาเข้าเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) โดยใช้กำลังขยายที่ 25 250 และ 500 นาโนเมตร พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพลาสติกก่อนการเผาโครงสร้างพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ผิวไม่มัน มีรูพรุนน้อยและรอยแตกของเนื้อเยื่อเหมือนรังผึ้ง ขยะพลาสติก (PP) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพลาสติกก่อนการเผา มีพื้นผิวที่เรียบ ผิวมันวาว ไม่มีรูพรุนและมีรูปทรงเหมือนก้อนหิน

ถ่าน SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เข้าเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าพื้นผิวลักษณะทางกายภาพว่ามีลักษณะมีความไม่เรียบ ผิวมันเงาคล้ายรังผึ้ง มีรูพรุนขนาดต่างๆ ซึ่งทั้ง 2 อุณหภูมินี้มีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ในลักษณะทางกายภาพที่อุณหภูมิ 500 °C มีรูปร่างคล้ายผลึกคริสตัล ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์พลาสติกขี้เลื่อยซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก 80-90 % และองค์ประกอบอื่นๆ หากอุณหภูมิที่ใช้เผานั้นสูง แนวโน้มของรูพรุนนั้นจะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

หมู่ฟังก์ชัน FTIR ของขี้เลื่อยและพลาสติกก่อนการเผาด้วยการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าขี้เลื่อยจะมีจุดฟังก์ชันมากกว่า 1 จุด ที่ตำแหน่ง 1026 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน (C-O stretching) ชนิดของอีเทอร์ (ether) หรือ C-N stretching ของอะตอมไนไตรล ของอีเทอร์ไนไตรล (ethyl nitrite) ฟังก์ชัน FTIR ของขี้เลื่อยและพลาสติกก่อนการเผาด้วยการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าพลาสติกจะมีจุดฟังก์ชันมากกว่า 1 จุด โดยมีตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 2916 cm^{-1} ตั้งอยู่ระหว่าง $2918\text{--}2954\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ฟังก์ชัน (C-H stretching) ของชนิดอัลเคน (alkane) หรือ C-H stretching ของชนิดอัลดีไฮด์ (aldehyde) นำถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C สามารถบอกถึงลักษณะของกลุ่มฟังก์ชันที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ กลุ่มฟังก์ชันไฮโดรคาร์บอน อัลคีน แอลกอฮอล์ และอัลคีน ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจฟังก์ชันของแต่ละตำแหน่งในสเปกตรัม FTIR สำหรับ SP Biochar ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โลหะหนักในน้ำเสีย การประยุกต์ใช้ถ่านในการดูดซับน้ำเสียเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการทำให้น้ำเสียถูกกักตุนและดูดซับออกจากสิ่งแวดล้อม ถ่านมักจะมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดีเนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวมาก และหมู่ฟังก์ชันที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งช่วยให้สามารถดูดซับสารเหล่านั้นได้มากขึ้น

เมื่อนำเศษขี้เลื่อยก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าเข้าเครื่องมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) พบว่าธาตุประกอบในเศษขี้เลื่อยก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้ามี องค์ประกอบของธาตุภายในขี้เลื่อย C=58.04% ,O=40.21% และ Al=1.76 ขยะพลาสติกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ องค์ประกอบของธาตุ

ภายในขยะพลาสติก C=88.02% ,O=7.87% ,Al=0.54% และ Ca=3.44% ในทางกลับกัน เมื่อนำถ่าน SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ที่อุณหภูมิ 300 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=79.49% , O=7.48% และ Ca=8.94% ที่อุณหภูมิ 400 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=86.80% ,O=8.67% ,Cl=1.94% และ Ca=1.72% และ ที่อุณหภูมิ 500 °C องค์ประกอบของธาตุภายใน SP Biochar C=87.00% ,O=8.51% ,Al=1.69% และ Ca=1.17% ในแต่ละอุณหภูมิ องค์ประกอบ C สูงสุดคือ ชี้อยู่ก่อนเผา C=58.04% , พลาสติกก่อนเผา C=88.02% , SP Biochar 300 °C =79.49 % , SP Biochar 400 °C =86.80% และ SP Biochar 500 °C =87.00%

ปริมาณธาตุที่อยู่ภายใน SP Biochar มีองค์ประกอบของออกซิเจน (O) แคลเซียม (Ca) และอลูมิเนียม (Al) อยู่เล็กน้อย ปริมาณธาตุส่วนใหญ่ที่พบมากที่สุดภายใน SP Biochar คือ องค์ประกอบของคาร์บอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของถ่าน SP Biochar ส่วนปริมาณธาตุที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C พบว่ามีปริมาณองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) เพิ่มขึ้นสูงจากการนำวัสดุทั้งสองมาผสมกัน แสดงให้เห็นว่าถ่าน SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงที่สุด แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของแต่ละธาตุอยู่ เพียงแต่ปริมาณของแต่ละธาตุจะแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ ในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงคาร์บอนก็จะสูงขึ้นตามลำดับ

คุณลักษณะของไอโซเทอมที่สังเกตได้คือไอโซเทอมการดูดซับประเภทที่สาม (Type III) คือ การดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุนและของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นหลัก แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับที่อ่อนแอทำให้ตัวดูดซับน้อยลง ขั้นตอนการดูดซับเฉพาะที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อการดูดซับหลายชั้นเกิดขึ้น แรงดึงดูดระหว่างการดูดซับ แผ่นบุรองที่อยู่รวมกันทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์สูง จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับชั้นแรก จะสมบูรณ์ในประเภทที่สาม (Type III) จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับมากกว่าประเภทที่สอง (Type II)

ผลการศึกษา X-ray diffraction (XRD) ของ SP Biochar ที่ส่องผ่านรังสีเอ็กซ์พบว่าถ่าน SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการสะท้อนของระนาบที่ (002) และ (101) ซึ่งแสดงถึงลักษณะของรูปหกเหลี่ยมระยะสั้น มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ การจัดตำแหน่งของคาร์บอนชั้นใน SP Biochar ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับแกรไฟต์ซึ่งมีการเลี้ยวเบนของมุมตกกระทบที่ (d002 และ d101) ที่จากการคำนวณสมการแบรกก์ แสดงว่า SP Biochar บ่งบอกได้ว่าถ่าน SP Biochar ที่เตรียมได้มีคุณลักษณะเป็นถ่านชาร์ตามที่ตั้งสมมติฐานไว้เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่พบมีลักษณะคล้ายกราฟไฟต์เป็นองค์ประกอบหลัก

ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี (CHNS) ของ SP Biochar พบว่าผลการทดสอบของ SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C องค์ประกอบของธาตุภายในมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าถ่าน SP Biochar มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงสุดที่อุณหภูมิ 500 °C มีปริมาณของคาร์บอนที่ 84% แต่กลับไม่พบค่า Sulfur ในทางกลับกันที่อุณหภูมิที่ 300 และ 400 °C มีปริมาณของธาตุไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์จะมีปริมาณใกล้เคียงกันไม่ต่างกันมาก จึงสรุปได้ว่าถ่าน SP Biochar มีปริมาณคาร์บอนเกิดขึ้นมากที่สุดเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิที่สูงมีผลต่อลักษณะทางเคมีของถ่าน ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิในการเผาปริมาณของคาร์บอนในถ่านก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

5.2 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากขี้เลื่อยผสมขยะพลาสติก (PP)

จากการทดลองศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C พบว่า Point of zero charge (pH_{pzc}) อยู่ระหว่าง 6 ถึง 6.17 บ่งบอกได้ว่าค่าที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลางหรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับหากค่า $pH < pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $pH > pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุลบสรุปได้ว่าประจุที่ผิว SP Biochar เป็นบวกที่เมื่อ $pH_{pzc} > pH$ ประจุที่ผิว SP Biochar เป็นลบที่เมื่อ $pH_{pzc} < pH$ สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้ดีในน้ำที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทเริ่มคงที่ จากผลการทดลองพบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิมีระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับคือ 60 นาที โดย SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500°C มีความสามารถดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทได้มากที่สุดถึง 71 มิลลิกรัม/ลิตร แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มีลักษณะสอดคล้องกับ แบบจำลอง Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) เป็นการดูดซับแบบถูกแบ่งออกเป็นชั้นๆ ที่มีขนาดต่างๆ กันและมีการดูดซับเกิดขึ้นอย่างเป็นบางส่วนในแต่ละชั้นนั้นๆ โดยที่แต่ละชั้นมีลักษณะการดูดซับที่คล้ายคลึงกัน แต่ขนาดของชั้นนั้นจะแตกต่างกันตามลักษณะของพื้นที่ผิวของ SP Biochar แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับพบว่า SP Biochar ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลองของเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich – Peterson) เป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานของแลงเมียร์และฟรุนดิสแตงนั้นกลไกการดูดซับจึงเป็นการผสมผสานแบบจำลองนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้นเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรก แต่ถ่าน SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลองของหลิว (Liu) เป็นการผสมผสานระหว่างแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดิสแตงเป็นสมมติฐานชั้น

เดียวของแบบจำลองแลงเมียร์และค่าอนันต์ นอกจากนี้ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับพบว่ากระบวนการดูดซับเป็นการดูดซับแบบกายภาพ แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับเกิดขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิโดยจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยของอุณหภูมิ จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซิเตรท เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

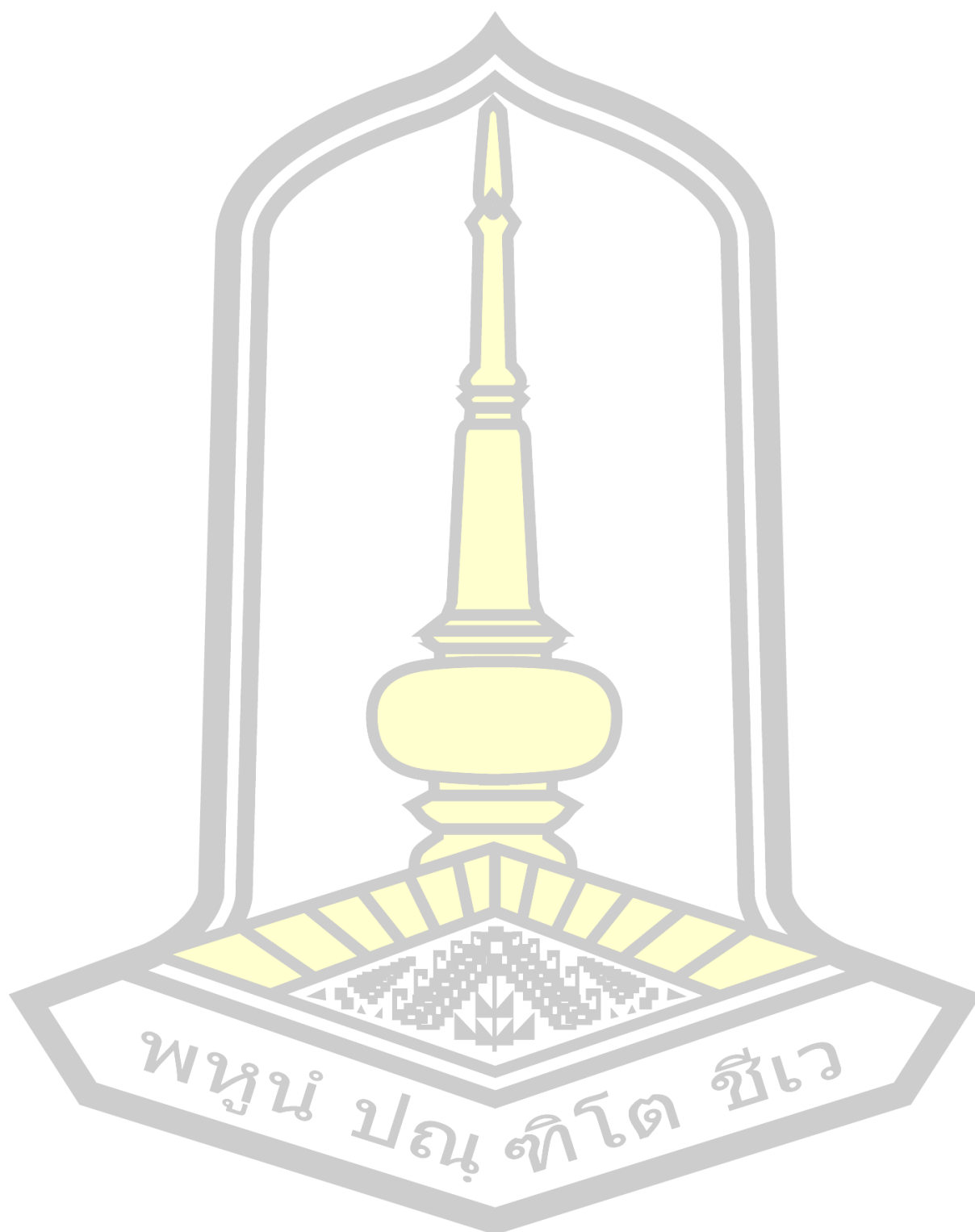
จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายคอปเปอร์ซิเตรท (Cu^{2+}) ด้วยถ่าน SP Biochar ที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน แบบช้า อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกสำหรับการบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังปล่อยสู่แหล่งน้ำ อีกทั้งยังสามารถลดทองแดงในน้ำเสียได้จริง

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการไฟโรไลซิสเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเผามีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์
- 2) จากการศึกษาผลได้ของถ่านชาร์ที่เตรียมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสารละลายที่มีโลหะอื่นๆประกอบเช่น แคดเมียม โปรท อาร์ซีนิก เป็นต้น
- 3) ควรประยุกต์ใช้กับน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมจริงชนิดอื่น เช่น โรงงานผลิตทองแดง อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น
- 4) ควรประยุกต์ใช้กับพลาสติกชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่แล้ว เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเผาที่อุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่าไฟโรไลซิสแบบช้า
- 5) ควรทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านชาที่เตรียมได้ แบบคอลัมน์

พูน ปณ จิต ชีเว

บรรณานุกรม



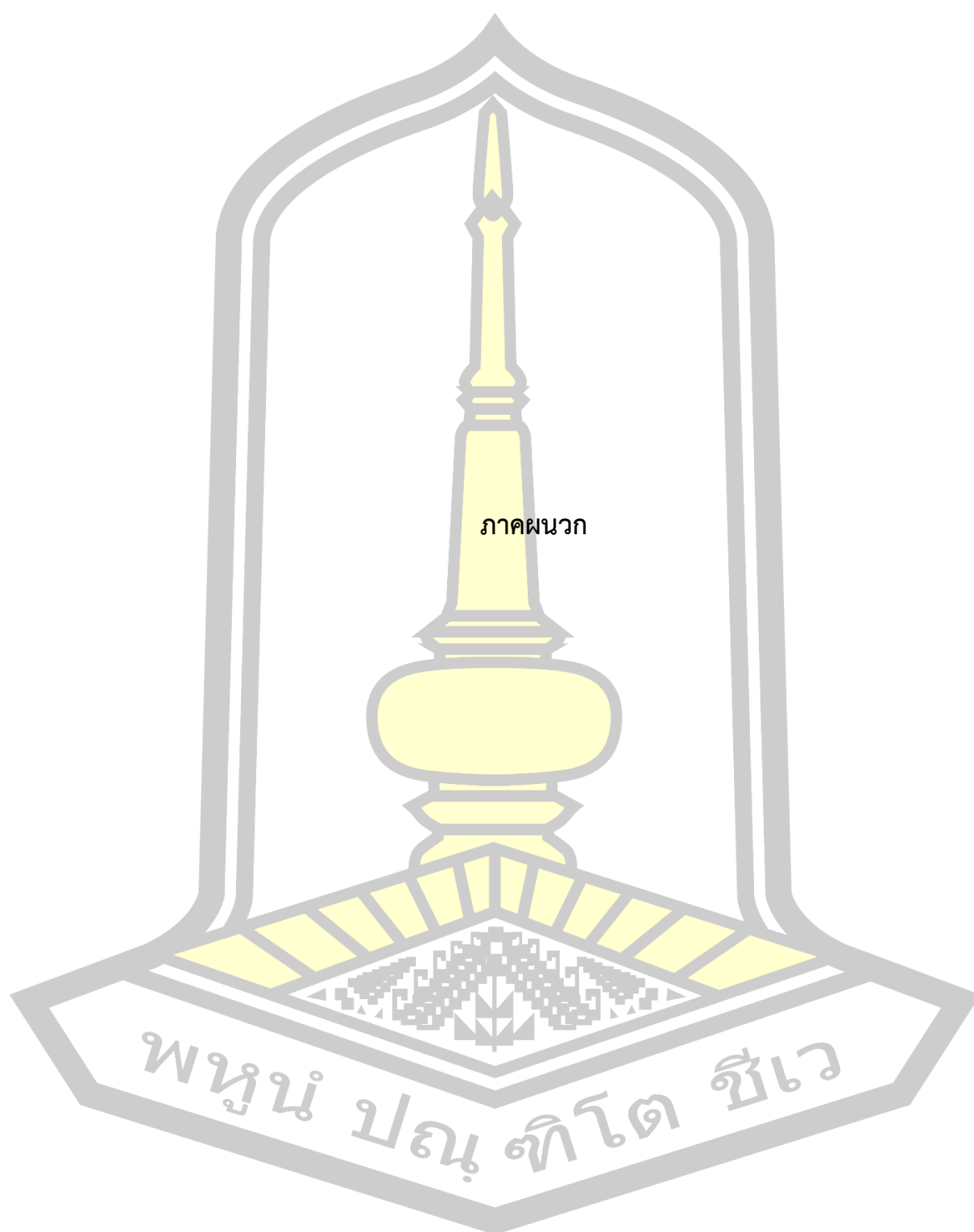
บรรณานุกรม

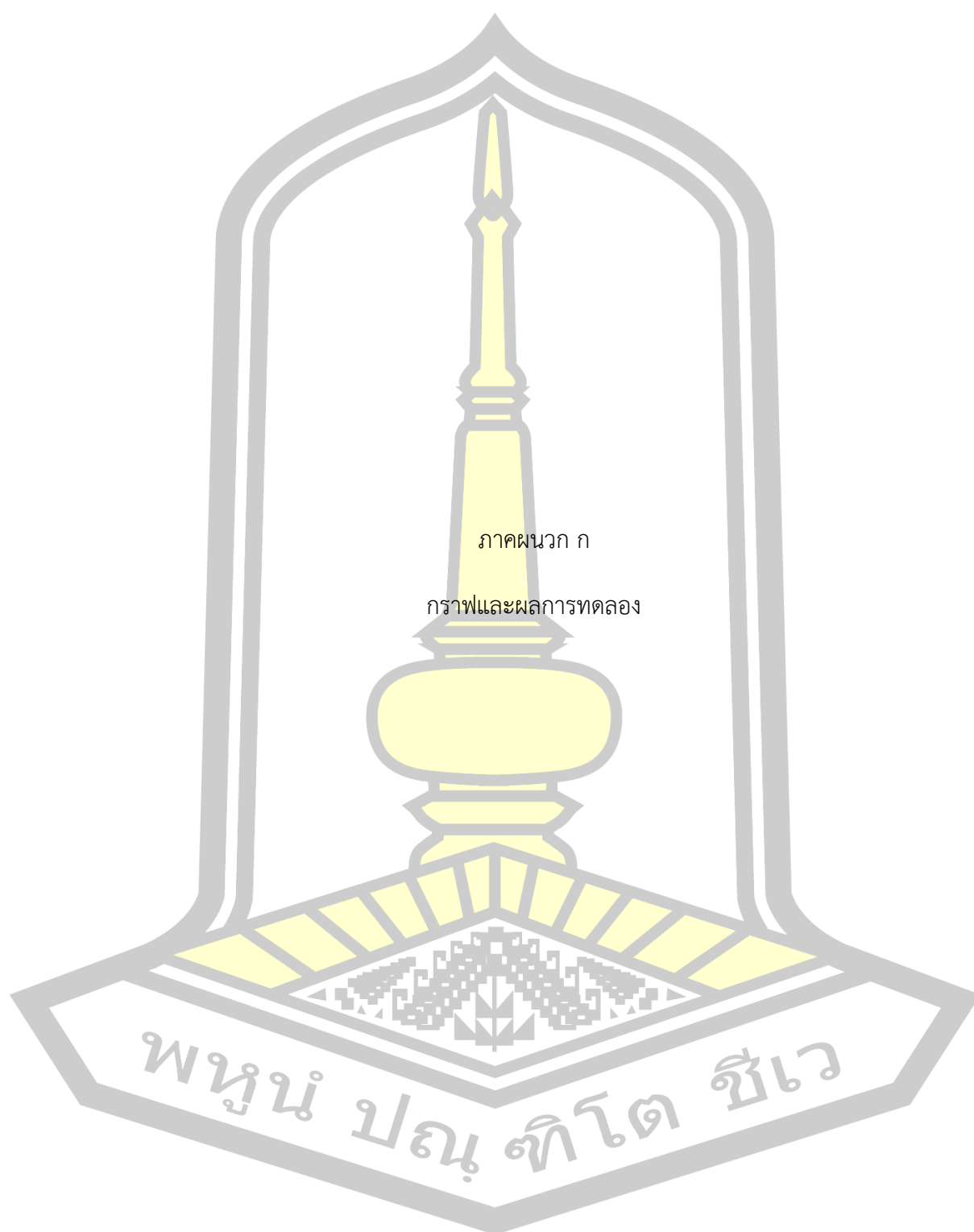
1. ดา, ไ.ว.ร.ศ.ศ.ก.ธ., พ.ม.ส.พ.ร.ก.ข.ต.ธ.ม. โม, and ส.ภ.ส. ดง, รูป แบบ การ จัดการ
สิ่งแวล้อม เชง พุทธ บูร ณา การ ใน เขต อุตสาหกรรม สุร นารี จัังหวดั นครราชสีมา.
วารสาร ม จร อุบล ปรีทรรศน์, 2020. 5(2): p. 32-46.
2. โกศล, ก.ก., et al., ไป โอชา ร์ (วัสดุ มหัตศจรรย): การ สั้เกราะห้ พิสูจัน เอกลักษณั และ
ศั้กยภาพ การ ประยุกต์ ใ้ งาน. วารสาร วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี, 2023. 25(1): p. 89-104.
3. วิทย์, โ. and อ.ท. มา, โครงการ ชุมชน และ เยาวชน สรั้างสรรรค์ ร่ว ม กัน คั้ด แยก ขยะ.
มหาวิทยาลัย สงขลา นครินทร์.
4. Wood Sawdust. 2017 [cited 2023 26]; Available from:
<https://energy789.com/th/articles/90848>.
5. Aigbomian, E.P. and M. Fan, Development of Wood-Crete building materials
from sawdust and waste paper. Construction and Building materials, 2013. 40:
p. 361-366.
6. Ammk. Wood. 2022 [cited 2023 4]; Available from:
<https://www.kachathailand.com/>.
7. บุญจรัส, น.ม.ต. ชั้เลื้อยรองพื้นบนดินแก้ปัญหากลันเหม็นในเล้าหรือคอกสัตว์. 2013 [cited
2023 6]; Available from: <https://www.gotoknow.org/posts/517338>.
8. จันทร, ว. and น. คง, การ ศั้กษา วัสดุ ปลุก จาก กาบ กลั้ว และ ชั้ เลื้อย. 2020.
9. ไทยโฮมทาวน์. ประโยชน์จากชั้เลื้อย. Available from:
<https://www.thaihometown.com/knowledge/11221/>.
10. กุล, ป. and ณ.ฐ. ภัทร, การ พัฒนา โปรแกรม คอมพิวเตอร์ สั้หรับ วิเคราะห้ สมดุล
พลังงาน ใน เตา หลอม อาร์ ค ไฟฟ้า. 2019.
11. BBC. Plastic waste. 2018 [cited 2023 26]; Available from:
<https://www.bbc.com/thai/international-45956262>.
12. Ratanasinh, M.G. Reducing plastic use of the population in Chachoengsao
Province.; Available from:
<https://mmm.ru.ac.th/MMM/IS/sun17/6114070022.pdf>.

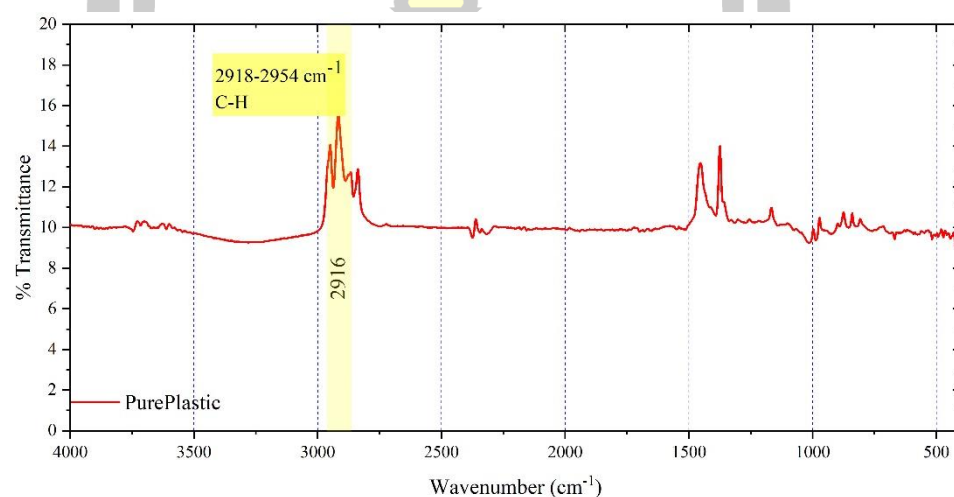
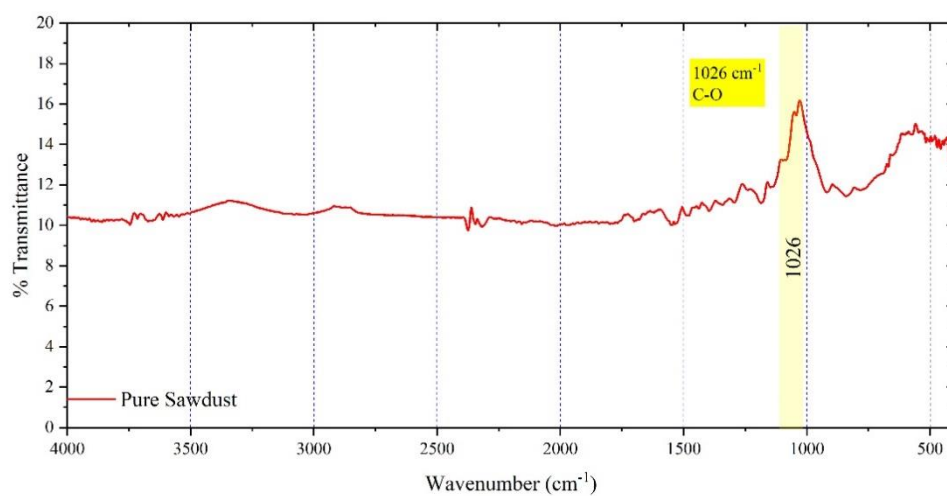
13. จิตติมา สุจินพรม. การจัดการพลาสติก. 2564 [cited 2023 7]; Available from: <http://gseda.nida.ac.th/academics/database/students/fileupload/isdocument/20220727220035.pdf>.
14. inside, B. วิธีใช้แบคทีเรียย่อยพลาสติกกลายเป็นโปรตีน. 2021 [cited 2023 7]; Available from: <https://brandinside.asia/protein-from-plastic-bottle/>.
15. ชัย, จ.ว.ล., แผน ธุรกิจ ขนบ ขบเคี้ยว หนังสือ ปลา แชลมอน ทอด กรอบ ตรา Praka. 2019.
16. agriculture, A.f.a.a. Biochar production. Available from: <https://www.baac.or.th/>.
17. Janjaiwit Supitchaya , e.a., การ ดูด ซับ และ การ ย่อย สลาย สาร ไตร โคล คาร์ บาน ทาง ชีวภาพ ด้วย ไบ โอชา ร และ ไบ โอชา ร ตรึง เซลล์ ที่ ผลิต จาก ไม้ไผ่ และ ยู คา ลิ ป ต์ ส. Journal of Engineering and Innovation, 2021. 14(1): p. 58-70.
18. Wichanop, K.W.a.D.A.A. Pyrolysis. 2015 [cited 2023 26]; Available from: https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241_p61-64.pdf.
19. Adsorption. กระบวนการดูดซับ. 2008 [cited 2023 27]; Available from: <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>.
20. Chanaroke, P., การ ปรับปรุง คุณภาพ ก๊าซ ชีวภาพ ด้วย กระบวนการ ดูด ซับ สลับ ความดัน. วารสาร สมาคม วิศวกรรม เกษตร แห่ง ประเทศไทย, 2012. 18(1).
21. Adisak, K., การ ศึกษา ตัว ดูด ซับ ราคา ถูก จาก เส้นใย ธรรมชาติ เหลือ ทั้ง เพื่อ กำจัด สี คริสตัล ไว โอ เลต. 2561.
22. เสาวภา, ไ., การ กำจัด ฟอสเฟต ใน น้ำ เสีย โดย การ ดูด ซับ ด้วย แคลเซียม คาร์บอเนต และ แคลเซียม ออกไซด์ จาก เปลือก ไข่ไก่. วารสาร วิชาการ พระจอมเกล้า พระนครเหนือ, 2016. 26(3).
23. Chankaew Chaiyot , e.a., การ ดูด ซับ ทาง ชีวภาพ ทองแดง (II) ด้วย ไฟ โบ ร อิน จาก รัง ไหม เหลือ ทั้ง. วารสาร วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี, 2015. 17(1): p. 51-59.
24. ศูนย์วิจัย, ศ.ค.ม. adsorption isotherm. [cited 2023 7]; Available from: <https://sites.google.com/site/csicscitu/instrument/kheruxngwikheraahkhunlaks-naphunthiphiwsurfaceareaanalyzer/adsorption-isotherm>.
25. Mittal, A., et al., Studies on the adsorption kinetics and isotherms for the removal and recovery of Methyl Orange from wastewaters using waste materials. Journal of hazardous materials, 2007. 148(1-2): p. 229-240.

26. พร้อม, ห.ร.ส.เ., จ.ร.อ. ภิญโญ, and ส.ส. เพือก, สมดุล และ จลนศาสตร์ การ ดูด ซั บ สี ดิ ส เพี ร์ สบ ลู 56 โดย ใช้ เส้นใย ปอ กระเจา ฝัก กลม: Equilibrium and Kinetics Adsorption of Disperse Blue 56 on White Jute Fiber. วารสาร วิทยาศาสตร์ บุรพา, 2022. 26(2): p. 852-868.
27. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. ทองแดง. 2557 [cited 2023 30]; Available from: file:///C:/Users/ACER/Downloads/.PDF.
28. Adam, R., The Contamination of Heavy Metals in Water and Sediments from Balekhiley Community Fishing Narathiwat Province. Princess of Naradhiwas University Journal, 2019. 11(3): p. 202-212.
29. ไทยรัฐ. ร้องโรงงานทองแดง 'ปล่อยน้ำเสีย' พบชาวบ้านมีสารตะกั่วในร่างกาย. [cited 2023 7]; Available from: <https://www.thairath.co.th/content/409191>.
30. materia, T. คุณสมบัติของทองแดง. [cited 2023 7]; Available from: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CopperProperties&LN=TH>.
31. KACHA. ทองแดง. [cited 2033 7]; Available from: <https://www.kachathailand.com/articles/>
32. Yu, B., et al., The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption—removal of copper. Journal of hazardous materials, 2000. 80(1-3): p. 33-42.
33. Kovacova, Z., S. Demcak, and M. Balintova, Removal of copper from water solutions by adsorption on spruce sawdust. Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 2019. 16(1): p. 52.
34. Hansen, H.K., F. Arancibia, and C. Gutiérrez, Adsorption of copper onto agriculture waste materials. Journal of hazardous materials, 2010. 180(1-3): p. 442-448.
35. Orozco, C.I., et al., Removal of copper from aqueous solutions by biosorption onto pine sawdust. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2023. 32: p. 101016.
36. Singh, R., et al., Optimization of chromium (VI) and copper (II) adsorption on chemically treated sawdust using response surface methodology. Asian Journal of Chemistry, 2017. 29(4): p. 728-734.
37. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ส.อ. X-Ray Diffractometer (XRD). [cited 2023 07]; Available from: <https://www.slri.or.th/bdd/th/>.

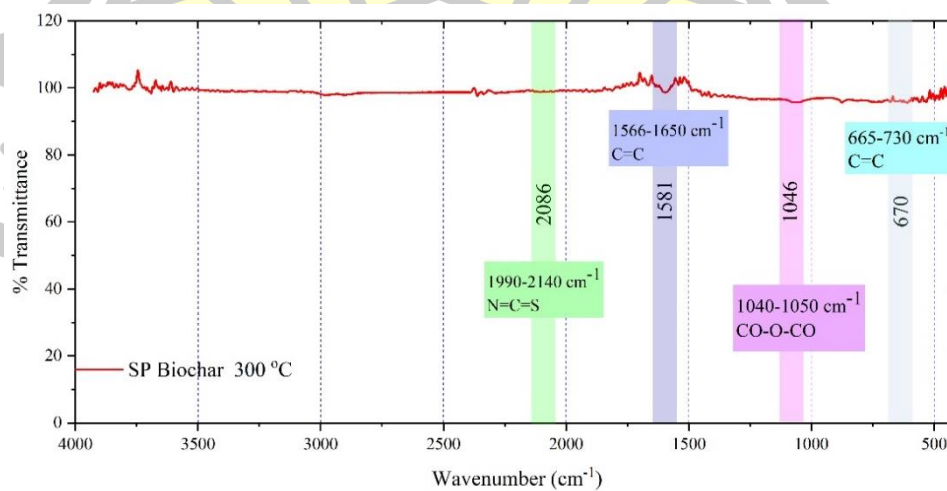
38. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ส.อ. FTIR Micro-Spectrometer. [cited 2023 07]; Available from: <https://www.slri.or.th/bdd/th/>.
39. โปะ, ว.ร.จ., รายงาน วิจัย การ เพิ่ม ประสิทธิภาพ ตัว เร่ง ปฏิกริยา เชิง แสง ไทเทเนียม ไดออกไซด์ ด้วย ซิลิกา จาก ชาน อ้อย ใน การ บำบัด น้ำ ชะ มูลฝอย จาก หลุม ฝัง ก ลบ.
40. SAECHIAM, S. and G. Sripongpun, ADSORPTION OF MALACHITE GREEN AND REACTIVE RED 31 FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY USING BANANA PEEL ADSORBENTS. 2019, Silpakorn University.
41. Khan, S.H., B. Pathak, and M. Fulekar, A study on the influence of metal (Fe, Bi, and Ag) doping on structural, optical, and antimicrobial activity of ZnO nanostructures. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2020. 3: p. 551-569.
42. ค้, ย.ว.ม.ว., การ ศึกษา การ แยก พาราเซตามอล ออก จาก น้ำ โดยใช้ ถ่าน กัม มันต์ ที่ ได้ป ด้วย ไนโตรเจน โดย เติริม จาก กะลา มะพร้าว ใน การ ดูด ซับ แบบ กะ ทิ้ง การ ทดลอง และ แบบ จำลอง เชิง โมเลกุล. สาขา วิชา วิศวกรรม เคมี สำนัก วิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี สุร นารี.
43. บัว, จ., et al., การ ระบุ สภาวะ ออกซิเดชัน ของ อาร์เซนิก (III) โดยใช้ เทคนิค x-ray absorption near edge structure (XANES).
44. Babalola, J.O., et al., Adsorption efficacy of Cedrela odorata seed waste for dyes: non linear fractal kinetics and non linear equilibrium studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016. 4(3): p. 3527-3536.
45. Lee, S.M. and D. Tiwari, Use of hybrid materials in the decontamination of bisphenol A from aqueous solutions. *RSC Advances*, 2014. 4(83): p. 43921-43930.
46. สุข, ม.ภ. and ภ. พรรณ, การ ดูด ซับ สาร กลุ่ม ยา ด้าน การ อักเสบ ชนิด ไม่ใช่ สเตียรอยด์ โดย วัสดุ-โครง ข่าย โลหะ อินทรีย์ ที่ ขึ้น รูป ด้วย อัล จี เนต และ โพลี ไวนิล ลิ ดีน ฟลูออไรด์. 2018.
47. Liu, Y., et al., A general model for biosorption of Cd²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ by aerobic granules. *Journal of biotechnology*, 2003. 102(3): p. 233-239.
48. Shakoor, S. and A. Nasar, Adsorptive decontamination of synthetic wastewater containing crystal violet dye by employing Terminalia arjuna sawdust waste. *Groundwater for Sustainable Development*, 2018. 7: p. 30-38.



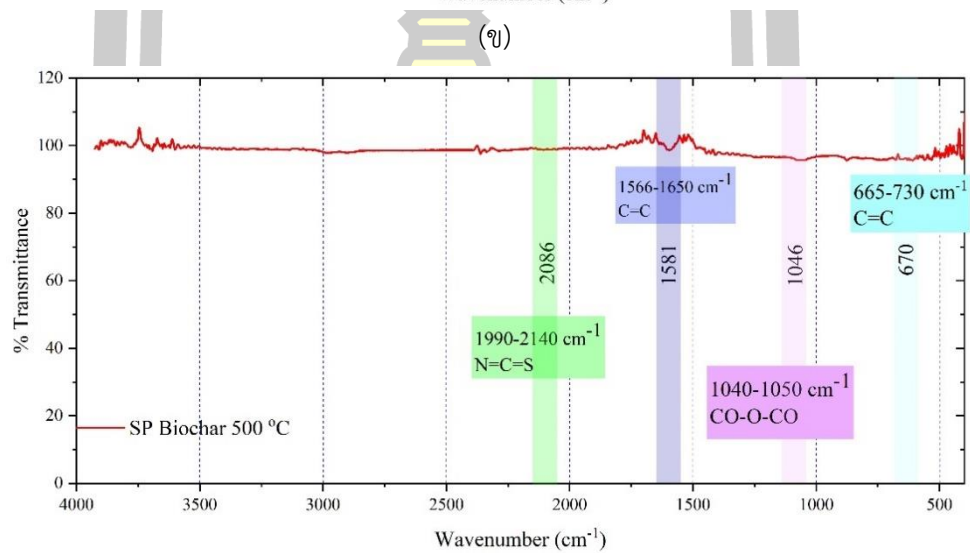
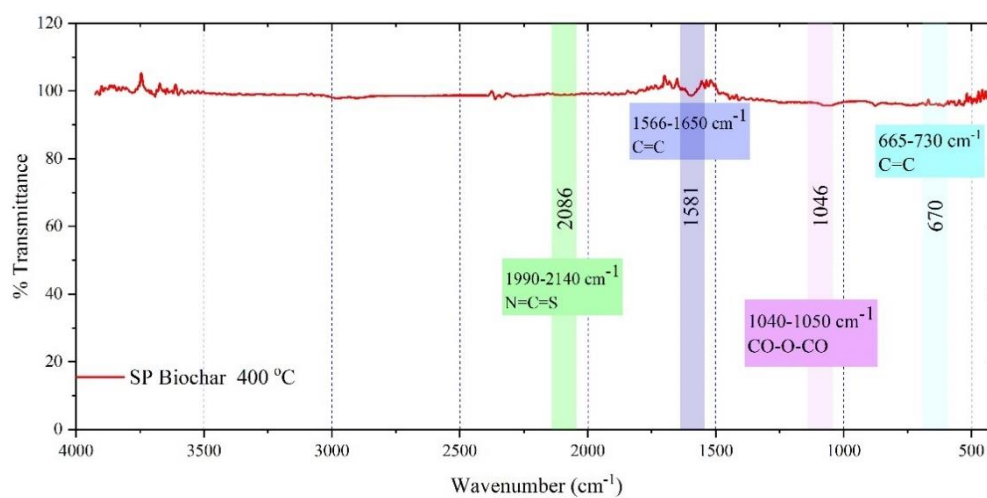




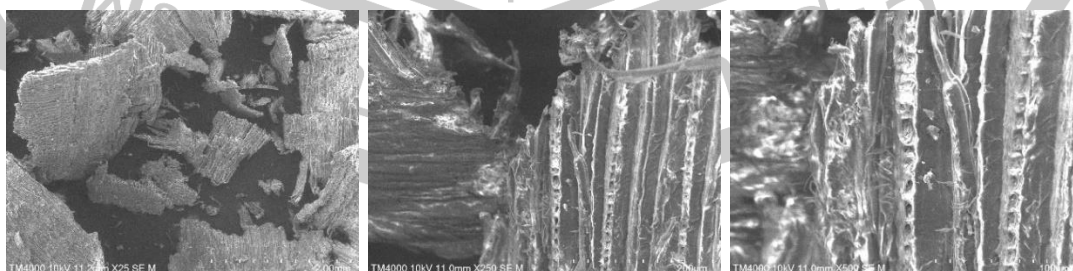
ภาพประกอบที่ 16 FTIR ของวัสดุที่ใช้ดูดซับ (ก) ขี้เลื่อย และ (ข) พลาสติก PP



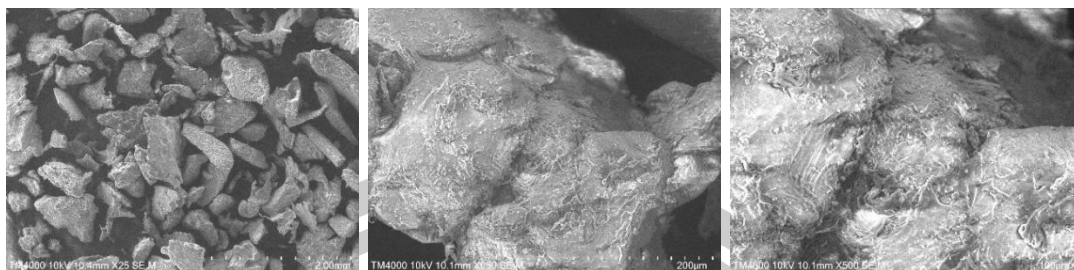
(ก)



ภาพประกอบที่ 17 FTIR ของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C

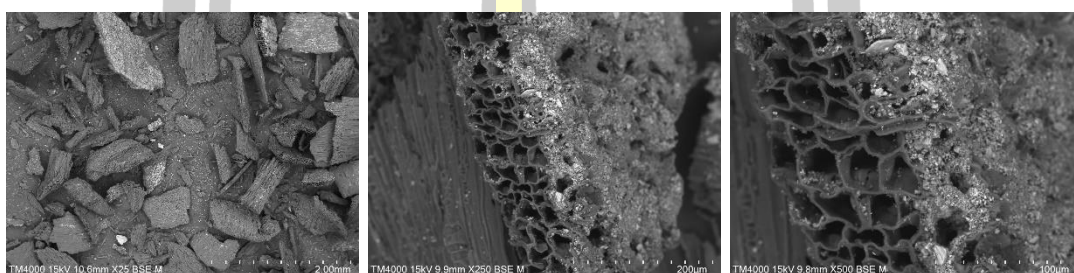


(ก)

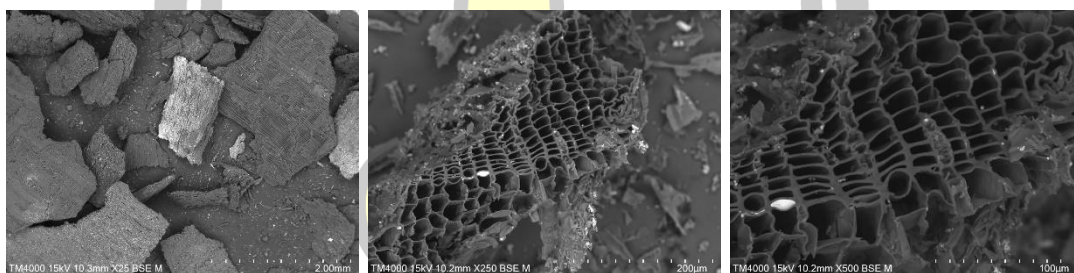


(ข)

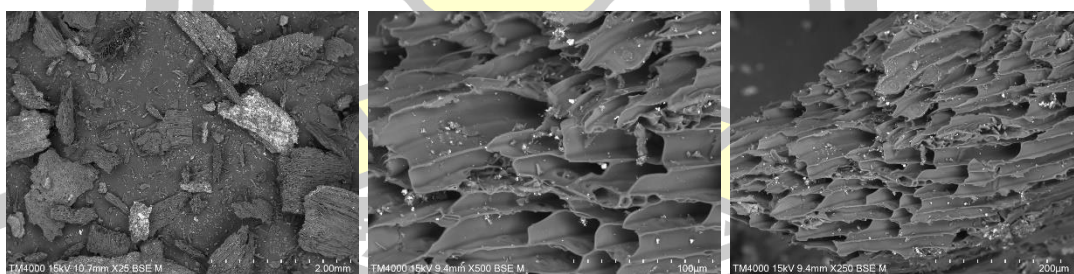
ภาพประกอบที่ 18 SEM-EDX ของวัสดุที่ใช้ดูดซับ (ก) ขี้เลื่อย (ข) พลาสติก



(ก)

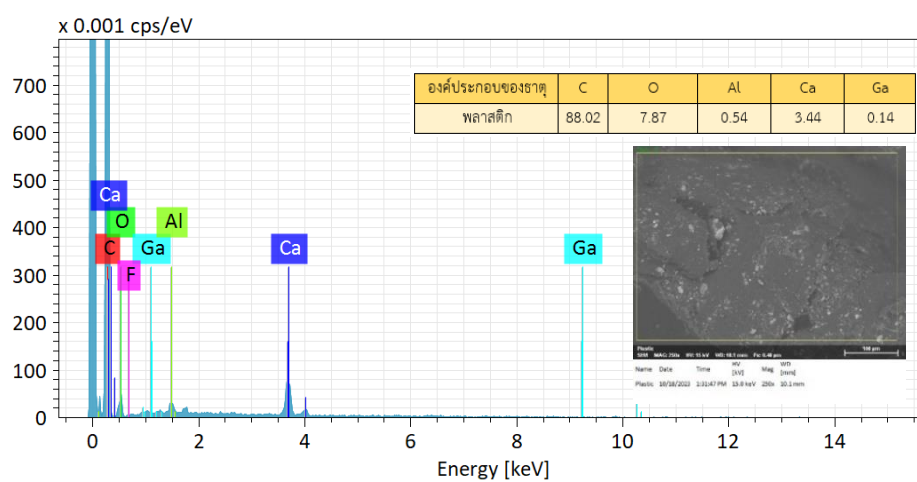
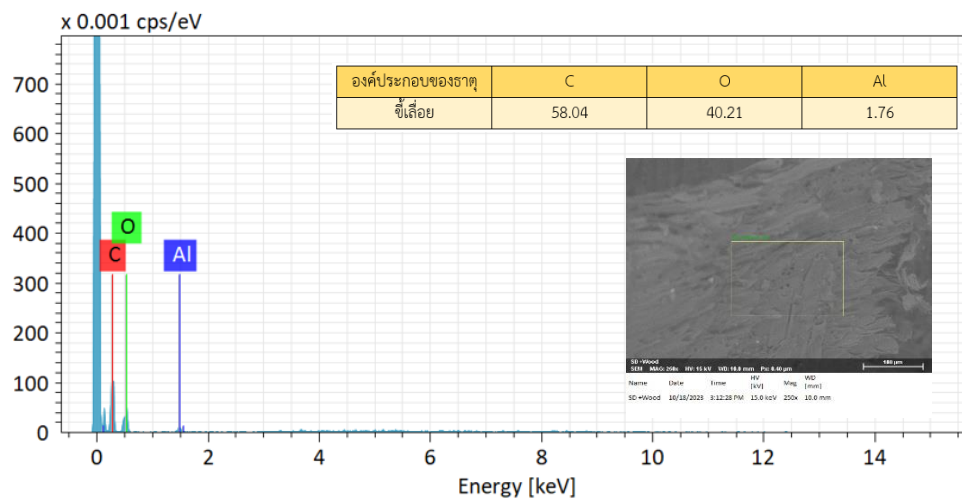


(ข)

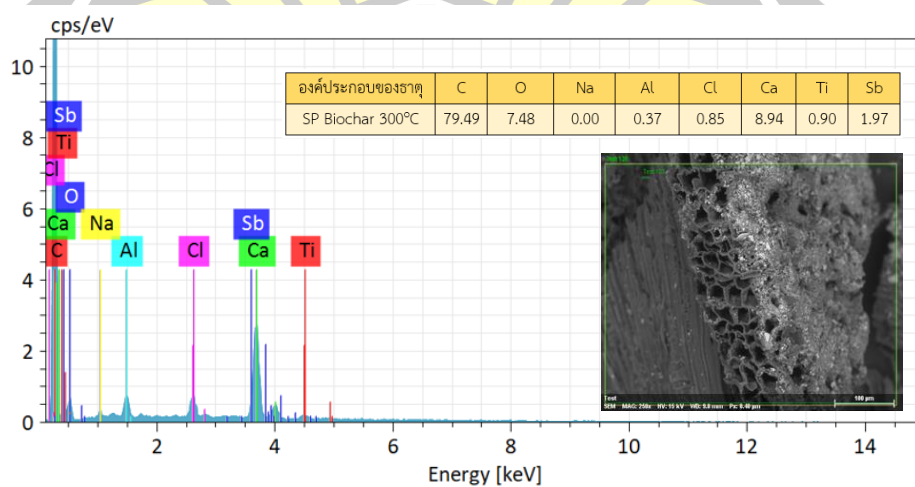


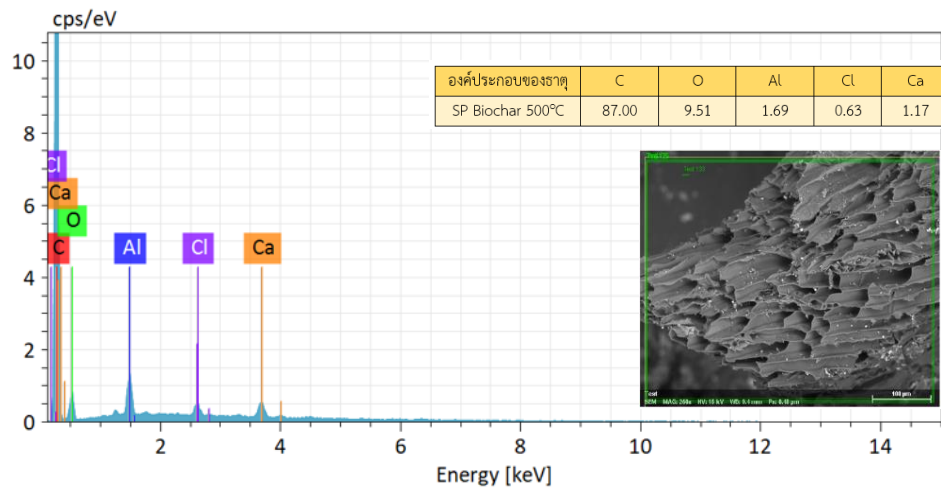
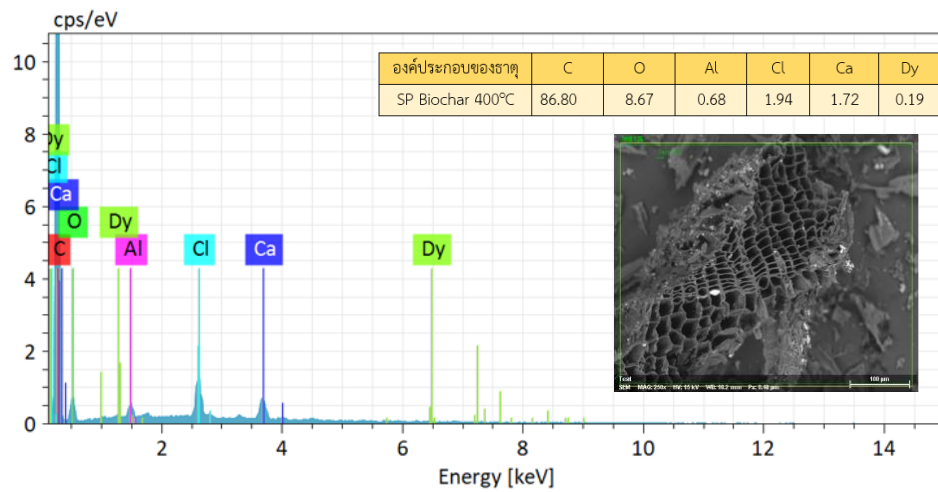
(ค)

ภาพประกอบที่ 19 SEM-EDXของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C, (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C

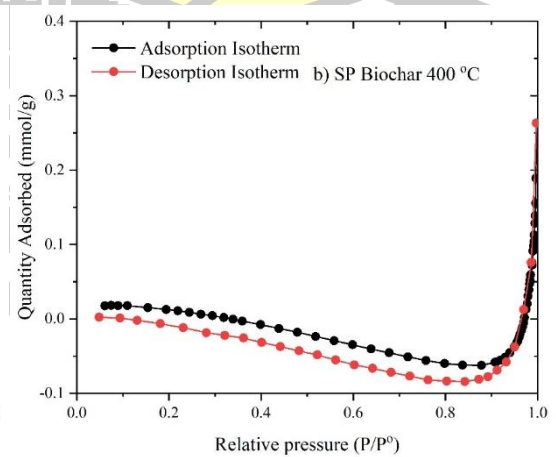
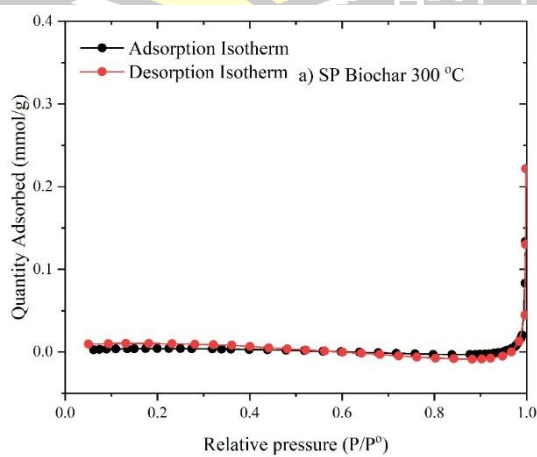


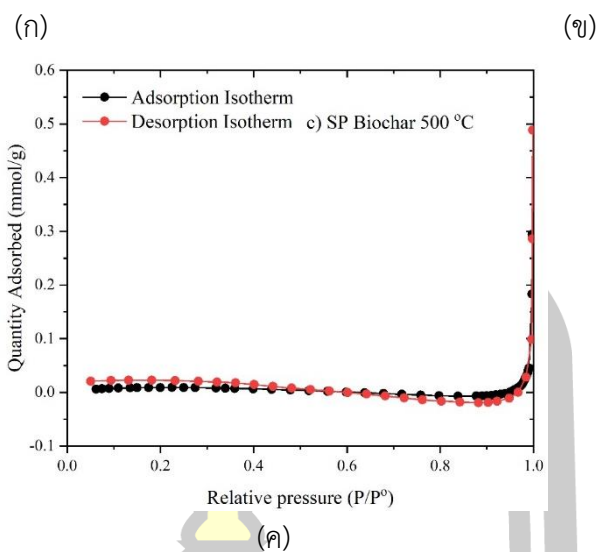
ภาพประกอบที่ 20 องค์ประกอบของธาตุ (ก) ชี้เลี้ยง (ข) พลาสติก PP



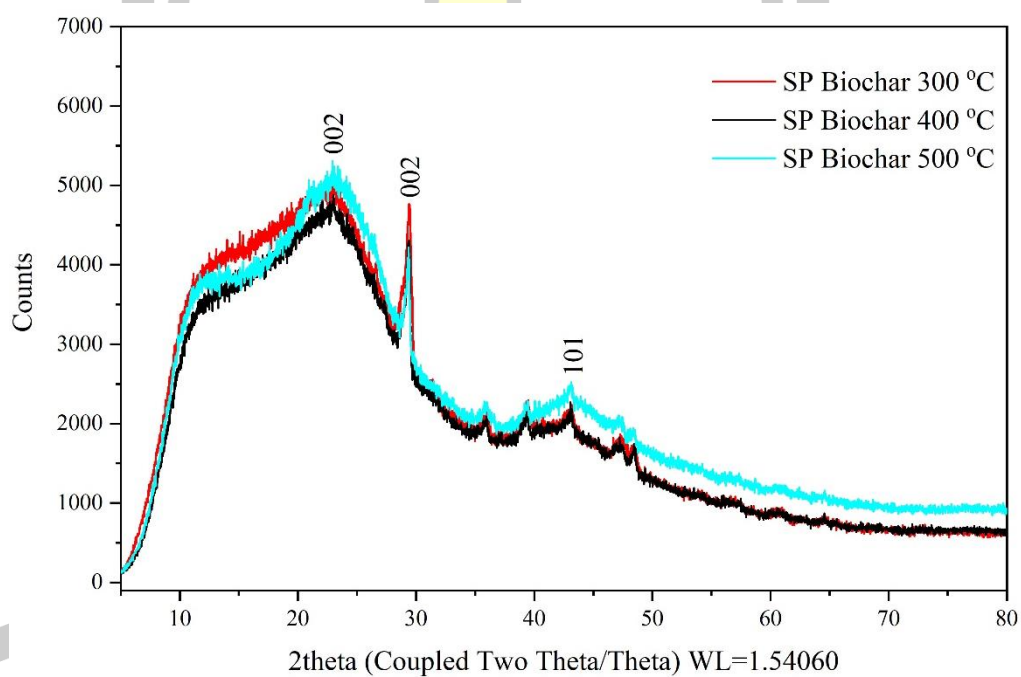


ภาพประกอบที่ 20 องค์ประกอบของธาตุ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C
(ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) SP Biochar อุณหภูมิ 500 °C

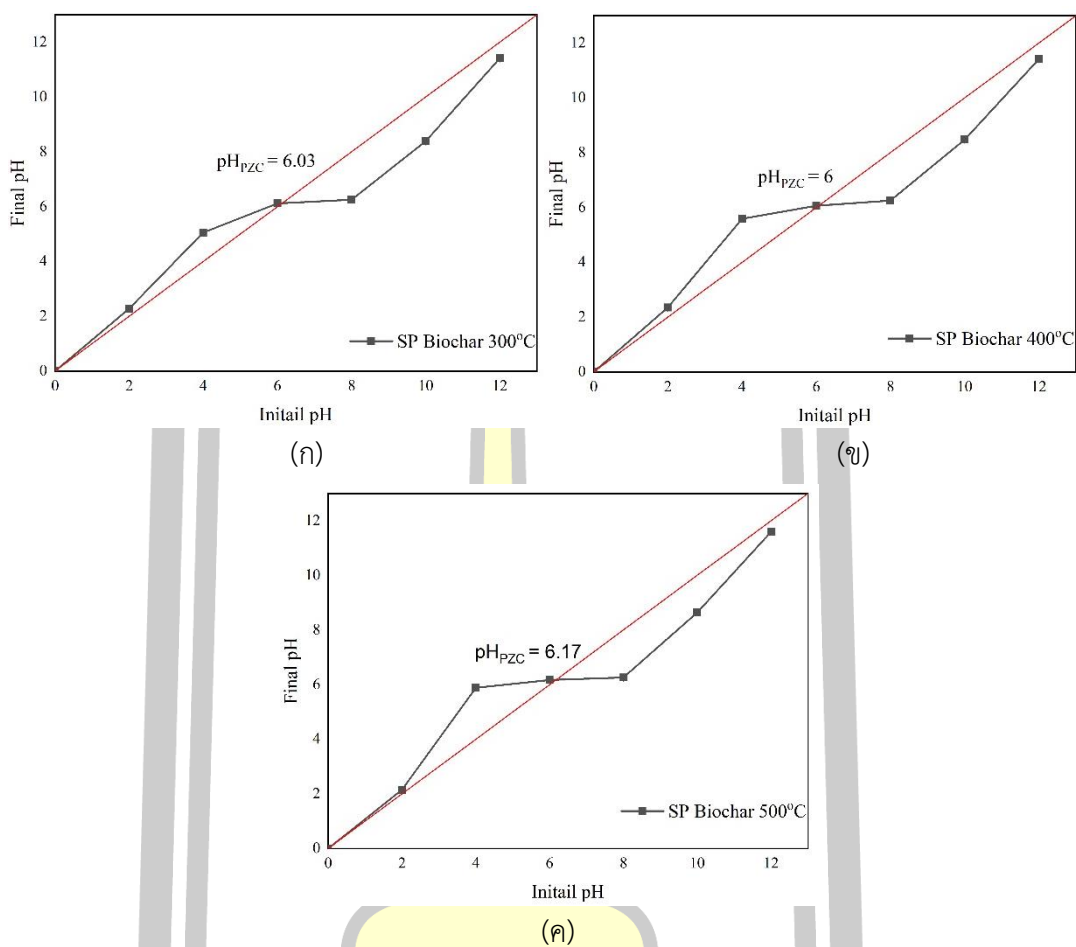




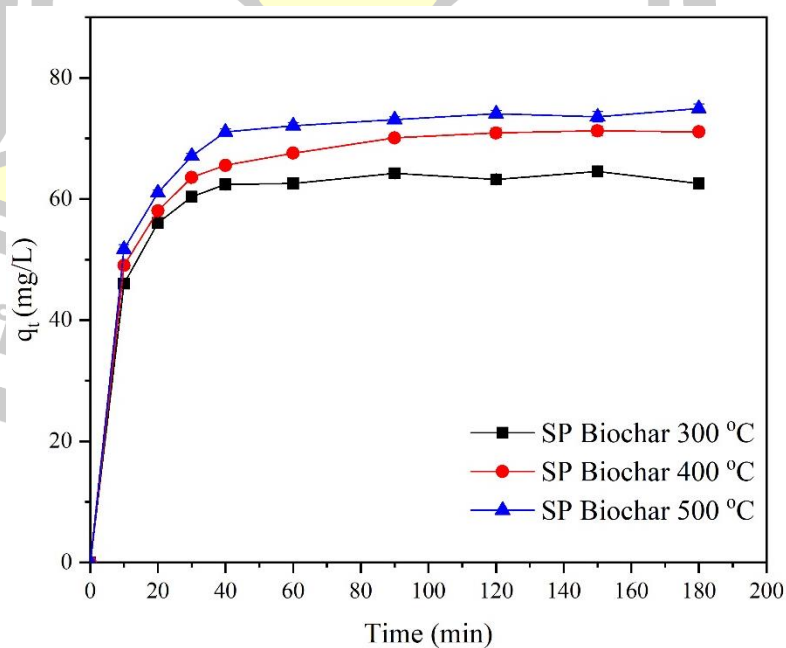
ภาพประกอบที่ 21 ไอโซเทอมของ SP Biochar ที่ผ่านกระบวนการเตรียมแบบไพโรไลซิสแบบช้า



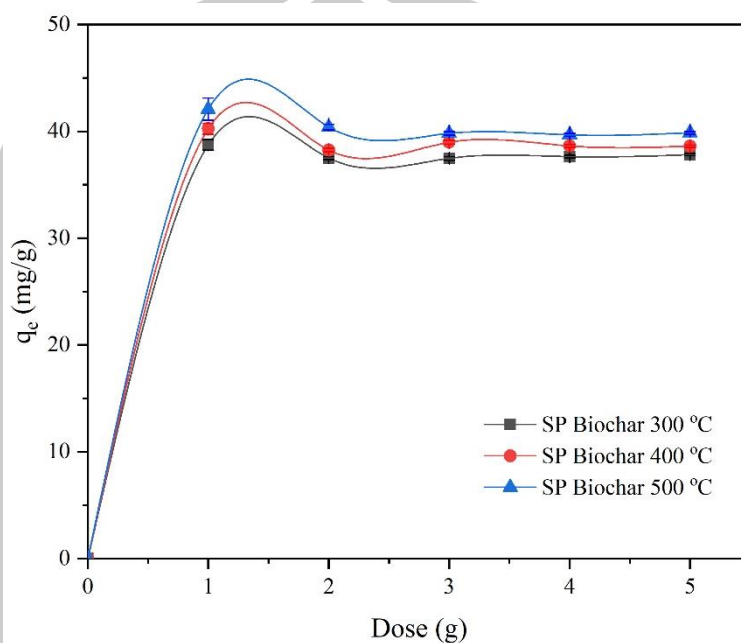
ภาพประกอบที่ 22 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึก SP Biochar ด้วยวิธี XRD



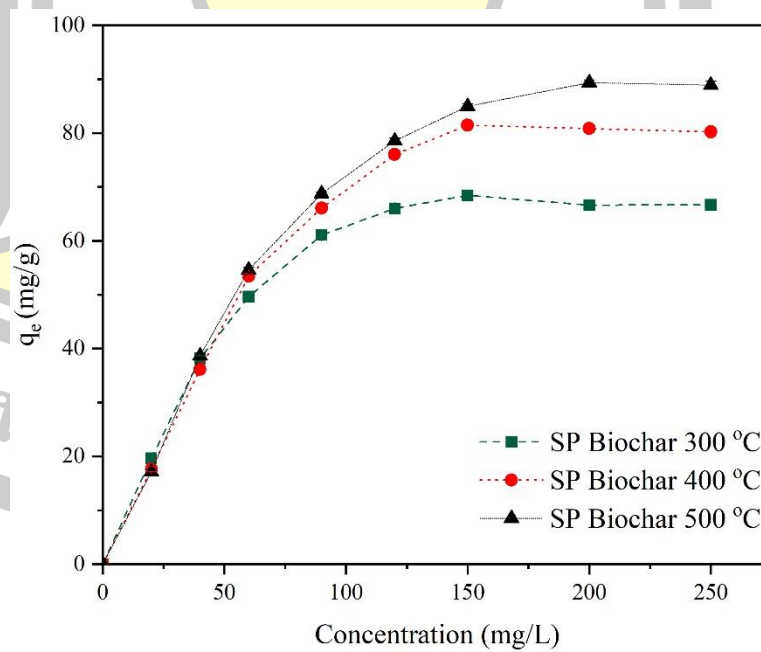
ภาพประกอบที่ 23 point of zero charge (pH_{pzc}) ของ SP Biochar (ก) SP Biochar อุณหภูมิ 300 °C (ข) SP Biochar อุณหภูมิ 400 °C (ค) SP Biochar ที่อุณหภูมิ 500 °C



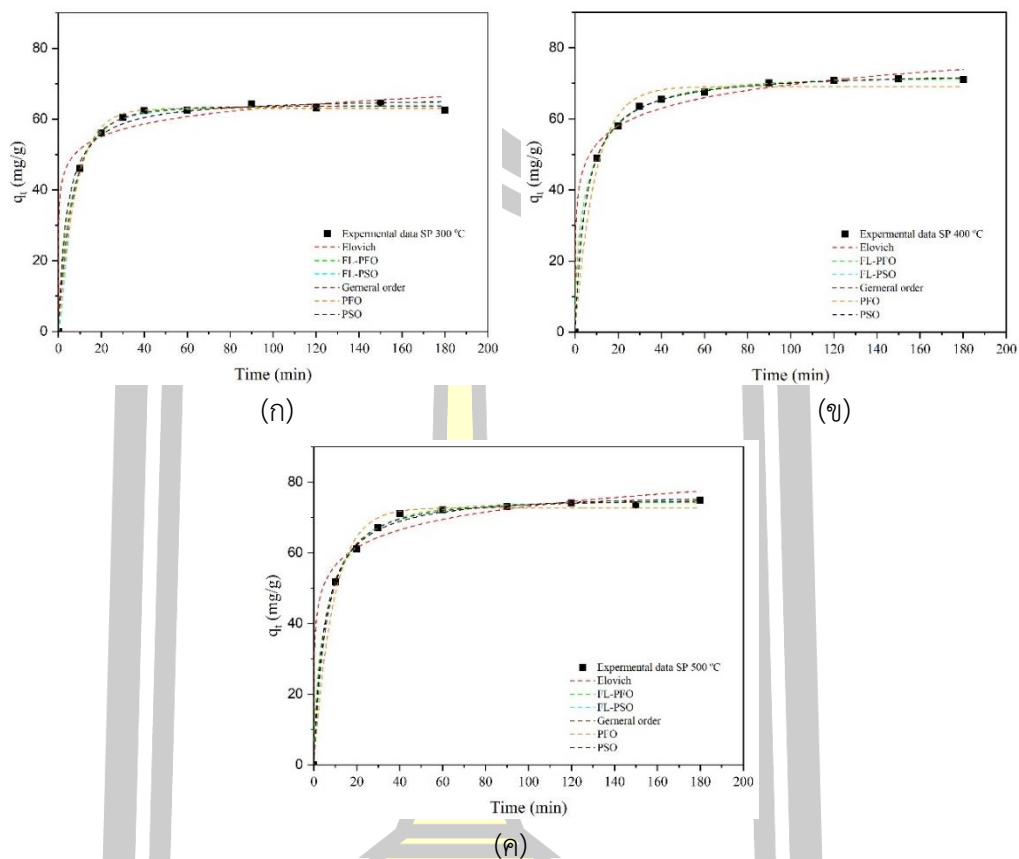
ภาพประกอบที่ 24 ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับของ SP Biochar



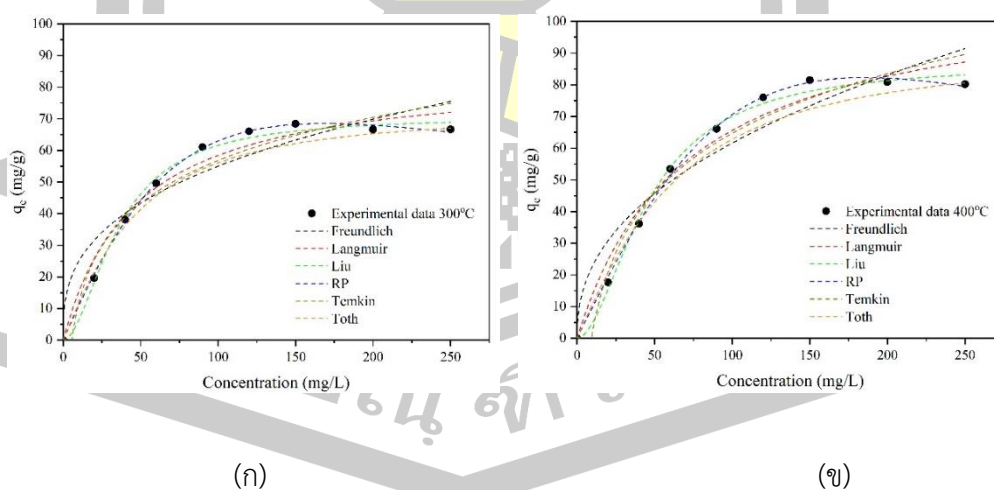
ภาพประกอบที่ 25 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงสังเคราะห์

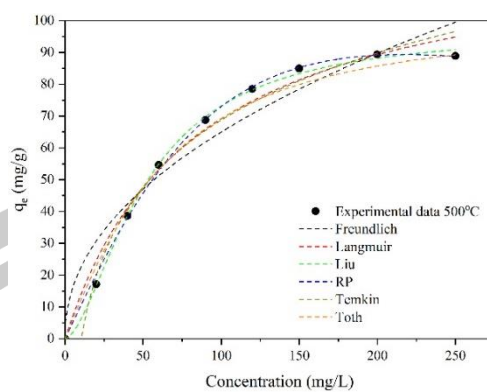


ภาพประกอบที่ 26 ความสามารถในการดูดซับของ SP Biochar



ภาพประกอบที่ 27 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ SP Biochar (ก) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 300 °C (ข) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 500 °C

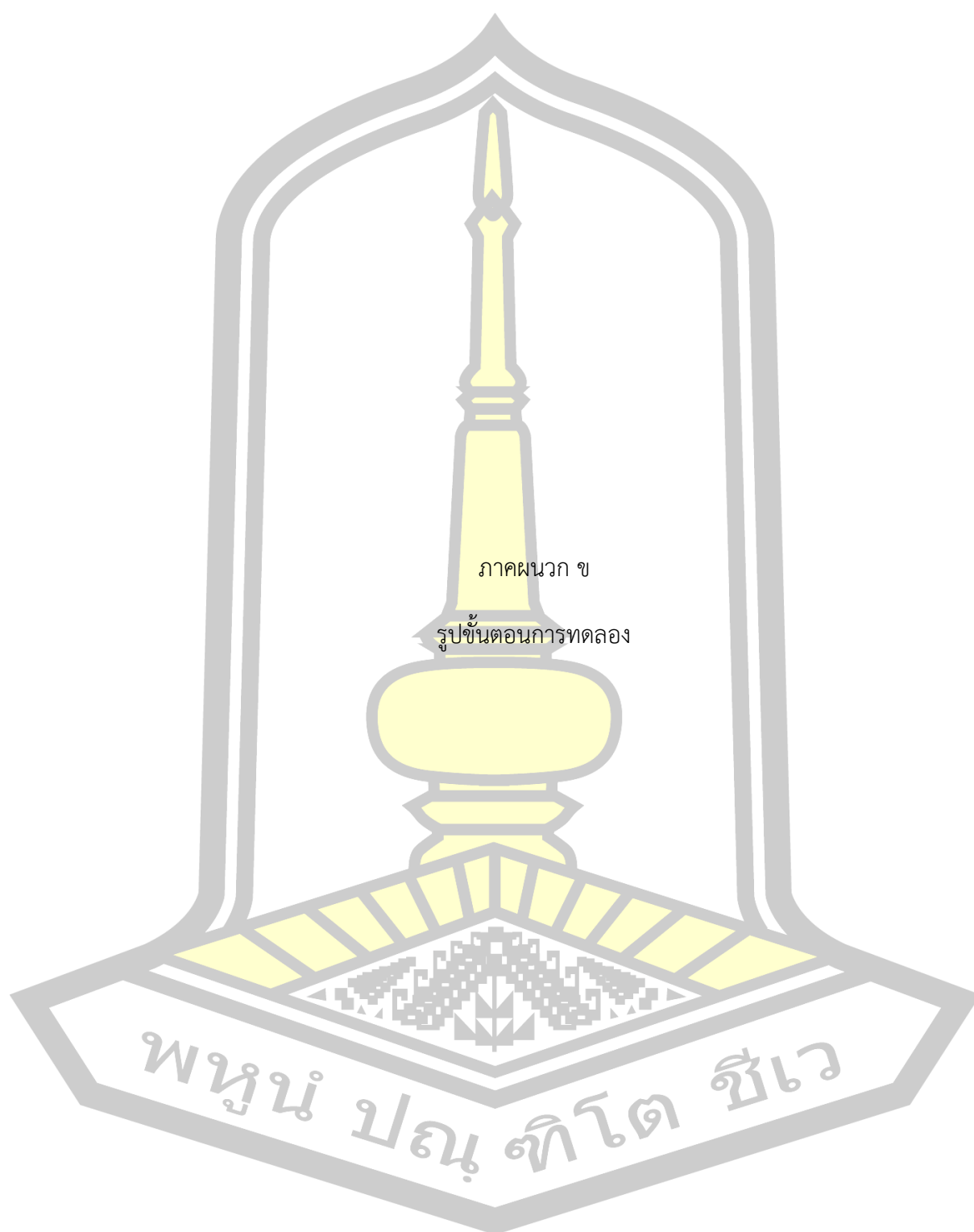




(ค)

ภาพประกอบที่ 28 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของ SP Biochar (ก) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 300 °C (ข) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 400 °C และ (ค) แบบจำ Isotherm อุณหภูมิ 500 °C





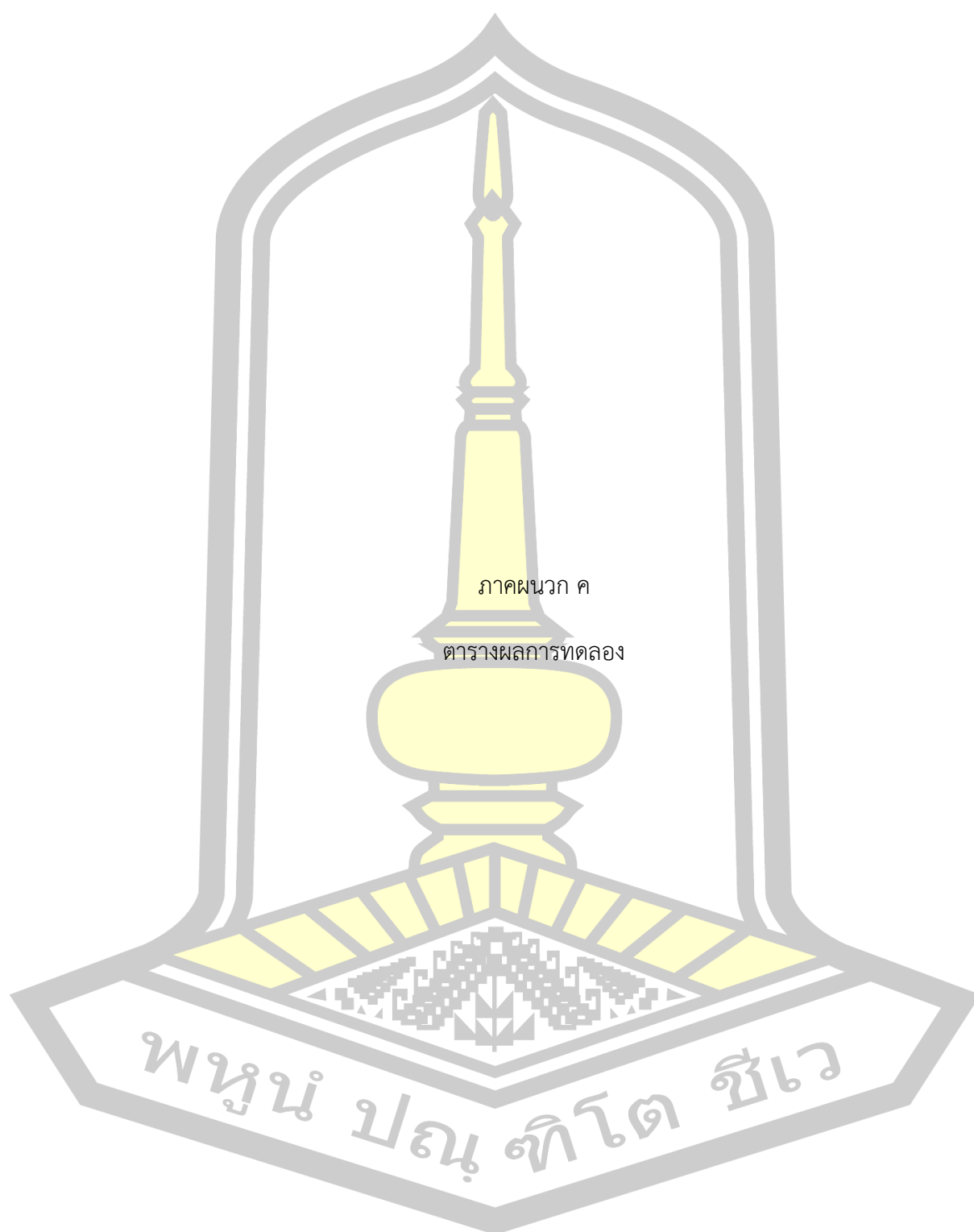


พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ ภาพการทำการทดลอง





ตารางพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของ SP Biochar

อุณหภูมิ	SP Biochar 300 °C	SP Biochar 400 °C	SP Biochar 500 °C
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	0.3020	0.3462	0.6656
ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (m^3/g)	0.001818	0.004006	0.004851
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)	24.075	56.0534	56.0534

ตารางแสดงคุณสมบัติทางเคมีของถ่าน SP Biochar

วัสดุตัวดูดซับ	ลักษณะหรือ สภาพตัวอย่าง	ผลการทดสอบ / รายการทดสอบ			
		Carbon (C) (% Wt)	Hydrogen (H) (% Wt)	Nitrogen (N) (% Wt)	Sulfur (S) (% Wt)
SP Biochar 300°C	ผงสีดำ	82.332	3.199	0.158	0.003
SP Biochar 400°C	ผงสีดำ	82.298	2.949	0.120	0.003
SP Biochar 500°C	ผงสีดำ	84.433	1.905	0.109	N.D.

ตารางค่าพารามิเตอร์การดูดซับจลนพลศาสตร์ของ SP Biochar

แบบจำลองไอโซเทอม	SP Biochar 300°C	SP Biochar 400°C	SP Biochar 500°C
Pseudo first order (PFO)			
q_e	63.0470	69.0766	72.7158
K_1	0.1236	0.1077	0.1090
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	1.2434	6.3318	5.0426
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	9.9471	50.6548	40.3414
R^2	0.9971	0.9881	0.9914
R^2_{adj}	0.9968	0.9866	0.9904

Pseudo second order (PSO)			
q_e	66.2887	73.6264	77.2317
K_2	0.0039	0.0026	0.0026
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	2.1222	0.1856	1.0661
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	16.9780	1.4847	8.5291
R^2	0.9952	0.9996	0.9982
R^2_{adj}	0.9946	0.9996	0.9979
General (rational) order			
q_e	63.7251	73.3892	75.3589
K_r	0.0452	0.0031	0.0094
n	1.2948	1.9599	1.6674
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.5265	0.2080	0.8250
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	3.6860	1.4560	5.7756
R^2	0.99896	0.99966	0.99878
R^2_{adj}	0.99866	0.99956	0.99843
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)			
q_e	63.5954	71.4731	74.3233
K_1	0.2233	0.3259	0.2781
α	0.7587	0.5505	0.6247
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.4685	0.1626	0.5993
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	3.27962	1.1388	4.1957
R^2	0.9990	0.9997	0.9991
R^2_{adj}	0.9988	0.9996	0.9988
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)			
q_e	64.0911	73.5099	75.9063
K_2	8.8641	0.0026	0.0017
α	1.6451	1.0133	1.1840
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.6597	0.21051	0.90902

Res. sum of squ. (g mg ⁻¹) ²	4.6179	1.4735	6.3631
R ²	0.9987	0.9996	0.9986
R ² _{adj}	0.9983	0.9995	0.9982
Elovich			
$\alpha_{(e)}$	11928.206	1046.1423	1670.7990
$\beta_{(e)}$	0.1951	0.1374	0.1372
Reduced Chi-Sqr. (g mg ⁻¹)	9.6788	5.3601	8.8506
Res. sum of squ. (g mg ⁻¹) ²	77.4310	42.8807	70.8050
R ²	0.9781	0.9899	0.9850
R ² _{adj}	0.9754	0.9887	0.9831

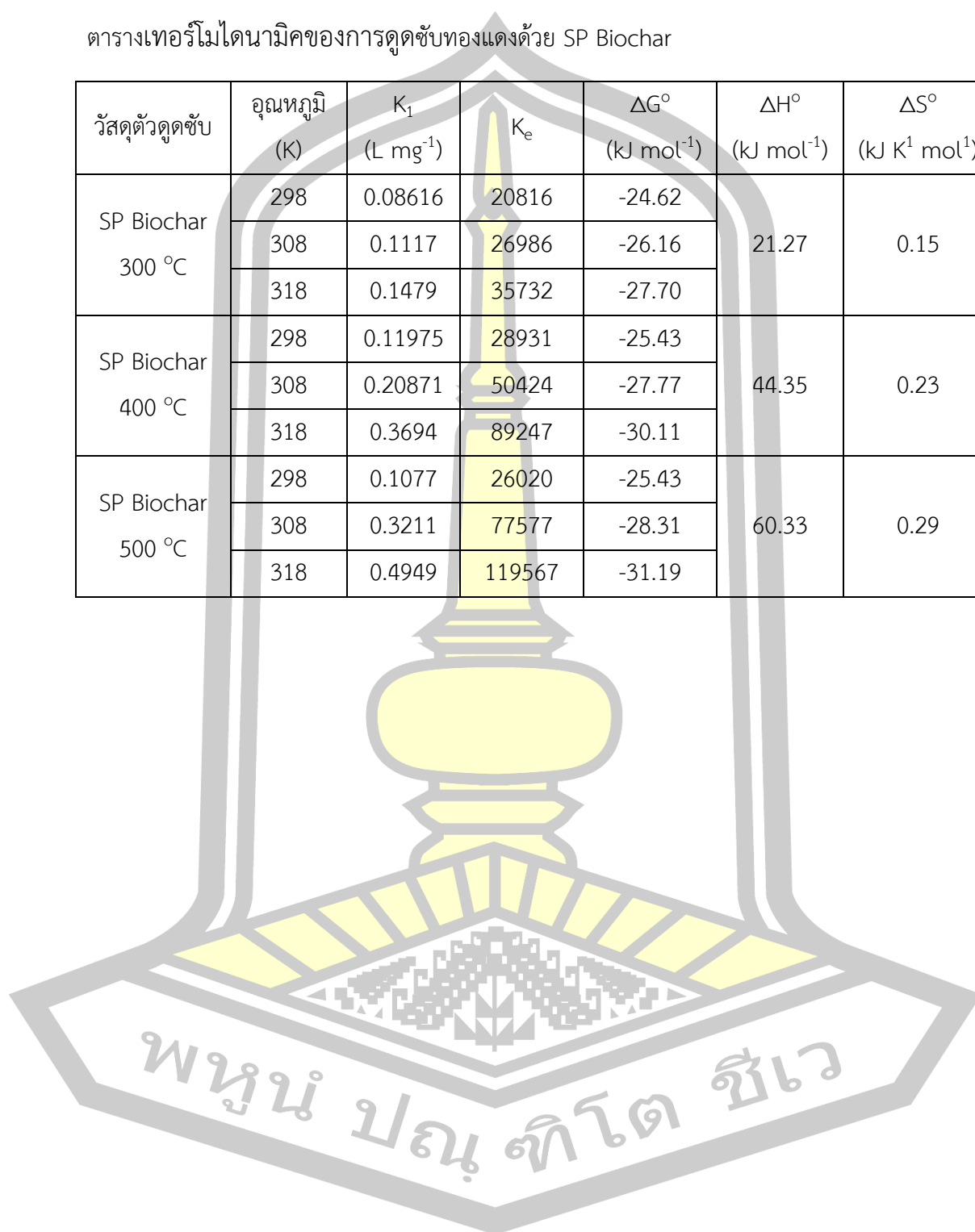
ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์การดูดซับไอโซเทอมของ SP Biochar

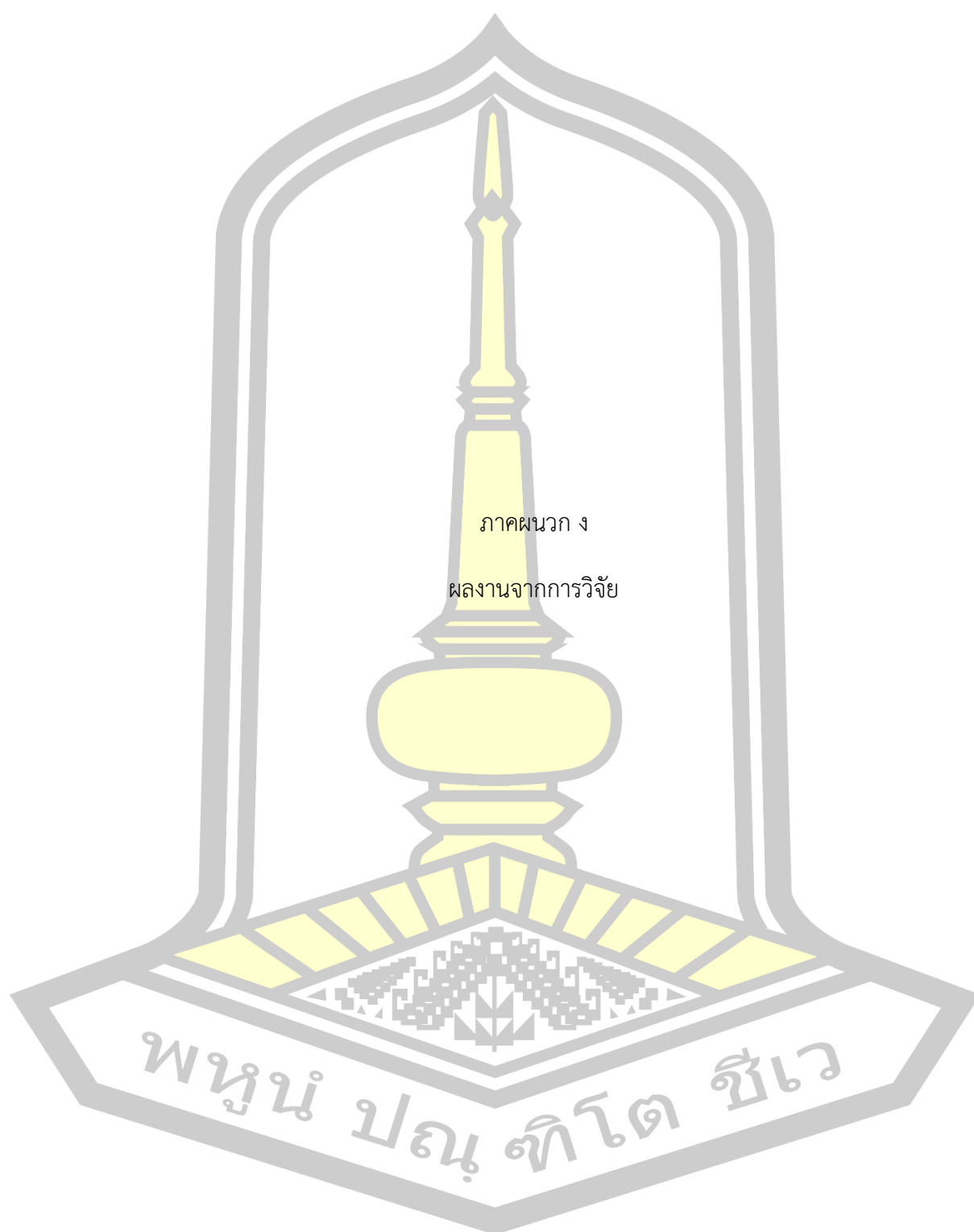
Model	SP 300°C	SP 400°C	SP 500°C
Freundlich			
k _f	11.2471	8.4844	7.6154
n _f	2.9004	2.3224	2.1481
Reduced Chi-Sqr. (g mg ⁻¹)	56.0227	79.2382	67.7496
Res. sum of squ. (g mg ⁻¹) ²	392.1589	554.6680	474.2472
R ²	0.9185	0.9245	0.9450
R ² _{adj}	0.9069	0.9137	0.9371
Langmuir			
q _m	85.4021	111.7436	126.1322
K ₁	0.0216	0.0142	0.0121
Reduced Chi-Sqr. (g mg ⁻¹)	18.4188	28.2073	19.4136
Res. sum of squ. (g mg ⁻¹) ²	128.9322	197.4511	135.8956
R ²	0.9732	0.9731	0.9842
R ² _{adj}	0.9694	0.9692	0.9819
Temkin			
b _t	0.1812	0.1082	0.0955

k_t	19.6247	27.1621	30.4534
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	29.2557	218.6357	16.7666
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	204.7905	0.0139	117.3668
R^2	0.9574	0.9702	0.9863
R^2_{agj}	0.9514	0.9660	0.9844
Liu			
q_m	70.8324	86.8131	97.3752
k_s	0.0281	0.0217	0.0194
n_s	1.8352	5.6914	1.6661
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	3.8656	34.1484	1.5562
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	23.1939	0.0110	9.3377
R^2	0.9951	0.9953	0.9989
R^2_{agj}	0.9935	0.9938	0.9985
Toth			
q_m	70.0000	90.0782	100.0000
k_{th}	0.0388	0.0124	0.0122
n_{th}	1.0000	1.5000	1.5000
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	60.3406	40.9015	16.6955
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	362.0437	245.4090	100.1731
R^2	0.9248	0.9666	0.9883
R^2_{agj}	0.8997	0.9554	0.9845
Redlich - Peterson			
k_{rp}	1.1039	0.9904	1.0394
α_r	5.2101	9.5927	2.1130
b	0.780	1.8113	1.6513
Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1})	0.0018	1.9475	2.3309
Res. sum of squ. (g mg^{-1}) ²	4.6854	11.6852	13.9855
R^2	0.9990	0.9984	0.9983
R^2_{agj}	0.9987	0.9978	0.9978

ตารางเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับทองแดงด้วย SP Biochar

วัสดุตัวดูดซับ	อุณหภูมิ (K)	K_1 (L mg ⁻¹)	K_e	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (kJ K ⁻¹ mol ⁻¹)
SP Biochar 300 °C	298	0.08616	20816	-24.62	21.27	0.15
	308	0.1117	26986	-26.16		
	318	0.1479	35732	-27.70		
SP Biochar 400 °C	298	0.11975	28931	-25.43	44.35	0.23
	308	0.20871	50424	-27.77		
	318	0.3694	89247	-30.11		
SP Biochar 500 °C	298	0.1077	26020	-25.43	60.33	0.29
	308	0.3211	77577	-28.31		
	318	0.4949	119567	-31.19		







The 15th International Conference on Science,
Technology and Innovation for Sustainable Well-Being
August 8th – 10th, 2023 | Luang Prabang, Lao PDR

EVE08

Characterization of Derived Biochar via Slow Pyrolysis Process using Sawdust and Plastics Waste as a Raw Precursor: A Case Study of Polypropylene (PP) Plastic Type

**Aitsara Chanthakhot¹, Poramed Aungthitipan¹, Pornmongkol Tansomros¹
Pattaranun Maskhunthod¹, Athicha Janthakot¹, Surachai Wongcharee^{2*},
Sukanya Hongthong³, Worachate Sangsida⁴, Chanakran Papayrata⁵ and
kowitz Suwannahong⁶ and Petch Pengchai²**

¹Mater candidate the field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham, 44150, Thailand

²Field of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham, 44150, Thailand

³Production Engineering and Automation System, Establishment Project of The Faculty of Engineering and Industrial Technology, Chaiyaphum Rajabhat University

⁴Mechanical Engineering, Establishment Project of The Faculty of Engineering and Industrial Technology, Chaiyaphum Rajabhat University

⁵Laboratory Equipment Center of Mahasarakham University

⁶Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand

*Corresponding Author: Surachai Wongcharee, Email:surachai.w@msu.ac.th

Abstract

The combination of plastic and sawdust can be used to create a composite material with specific properties such biochar that takes advantage of the properties of each component. The specific formulation and manufacturing process would depend on the desired characteristics and the intended application of the composite. It is worth noting that there might be various ratios and techniques to optimize the composite's properties, and additional additives or modifiers may be incorporated as well. Composite sawdust and biochar were made to characterize the structure of charcoal in order to improve wastewater by using waste material as a precursor. From the study of the chemical and physical structure, it was found that 80-90 percent of the trace elements in SP biochar were carbon. The physical characteristics of SP Biochar can be observed that the surface is smooth, like a honeycomb, not shiny, with pores of various sizes. It has a specific surface area of about 0.6656 m²/g. The isotherm is the Type III of isotherm. There are functional groups found in SP biochar such as hydroxyl group (-OH, 1990-2140 cm⁻¹), carboxyl group (-COOH, 1040-1050 cm⁻¹), phenolic group, 1 (-OH is attached to an aromatic ring, 1566- 1650 cm⁻¹) and ether (-O) groups. They contribute to the stability of the biochar structure and can influence the hydrophobicity of the charcoal. It can be concluded that SP biochar can be used as a water and wastewater sorbent.

Keywords: Sawdust, Plastic waste, Biochar, Slow pyrolysis

Research Article

Enhanced Biochar Production via Co-Pyrolysis of Biomass Residual with Plastic Waste after Recycling Process

Sukanya Hongthong¹,^{*} Worachate Sangsida,¹ Surachai Wongcharee²,^{*}
Aitsara Chanthakhot,^{2,3} Poramed Aungthitipan,^{2,3} Kowit Suwannahong⁴,
Torpong Kreetachat⁵ and Javier Rioyo⁶

¹Mechanical Engineering, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University, Chaiyaphum 36000, Thailand

²Field of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kham Rieng, Kantarawichai, Mahasarakham 44150, Thailand

³The Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kham Rieng, Kantarawichai, Mahasarakham 44150, Thailand

⁴Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand

⁵Department of Environmental Engineering, School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand

⁶Ctra. Torres - Reocin, B° La Barquera 13, Cartes 39311, Cantabria, Spain

Correspondence should be addressed to Surachai Wongcharee; surachai.w@msu.ac.th

Received 15 December 2023; Revised 24 January 2024; Accepted 1 February 2024; Published 17 February 2024

Academic Editor: Valeria Di Sarli

Copyright © 2024 Sukanya Hongthong et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Biomass pyrolysis for oil production results in biochar byproduct, whose characteristics can be improved by the reuse of waste plastics. While the plastic recycling process leads to a large amount of plastic waste that cannot be reused, this underutilized feedstock holds the potential for coprocessing with biomass, thereby increasing the likelihood of producing valuable biochar products. This study sought to evaluate how the inclusion of plastic waste influences the pyrolysis of biomass residue. To this end, sawdust and hardwood biomass were chosen as materials to investigate how the presence of plastics might alter the properties of the resulting chars. Synergies were observed among the biomass components, particularly in samples with higher lignin content from hardwood biomass, which resulted in increased biochar yields. The results showed that a 20% blend of plastic waste with wood at 300°C produced a solid char with a yield of 40% by weight. Co-pyrolysis of the biochar derived from blends of 20 wt. % PP with both sawdust and hardwood resulted in significant enhancement of various properties of the resulting biochar, including surface area, carbon content, hydrophobicity, and aromaticity. This enhancement had a favorable effect on the carbon content and calorific values of the biochar. These enhanced properties significantly contributed to the biochar's capacity for sorbing substances like various heavy metals. It can be proved that this result showed the importance of the energy content of biochar and its potential use for renewable applications. The beneficial combined effect seen in the plastic blends can be credited to the interaction between the biomass and polymer components, resulting in the production of fewer volatile products at higher temperatures. It can be suggested that biochar from biowaste and plastic waste not only reduces environmental impact but also converts it into a valuable and eco-friendly product.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายอิสรา จันทโคตร
วันเกิด	วันที่ 8 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2542
สถานที่เกิด	จังหวัดนครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 34 หมู่ที่ 2 ตำบลโนนตาล อำเภอท่าอุเทน จังหวัดนครพนม รหัสไปรษณีย์ 48120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย จังหวัดนครพนม พ.ศ. 2560 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย จังหวัดนครพนม พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

