



การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์ผสมจากเศษไม้และพลาสติกเหลือทิ้งจาก
กระบวนการ ผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

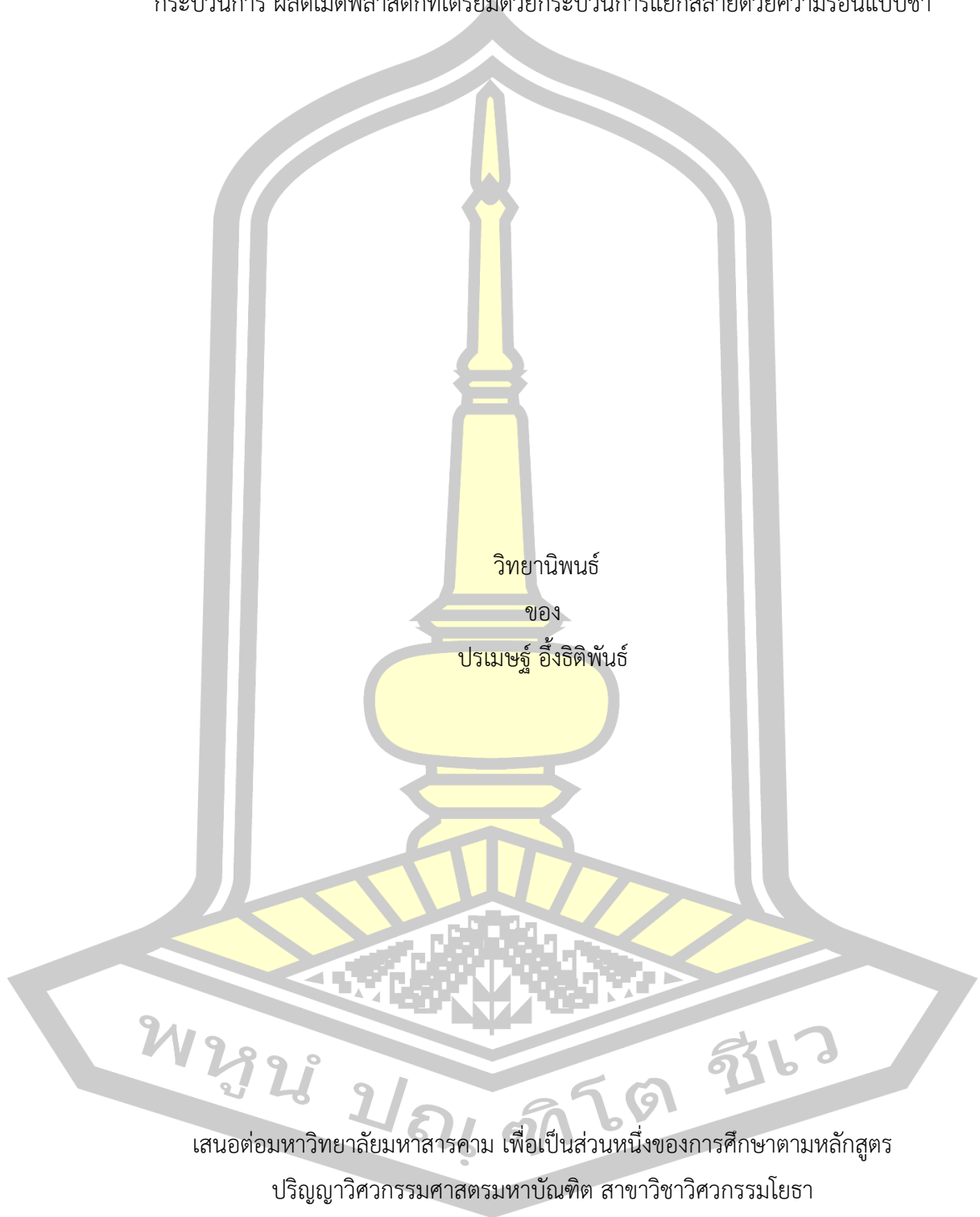
วิทยานิพนธ์
ของ
ประเมษฐ์ อึ้งธิติพันธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การจัดทำทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์ผสมจากเศษไม้และพลาสติกเหลือทิ้งจาก
กระบวนการ ผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบซ้ำ



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

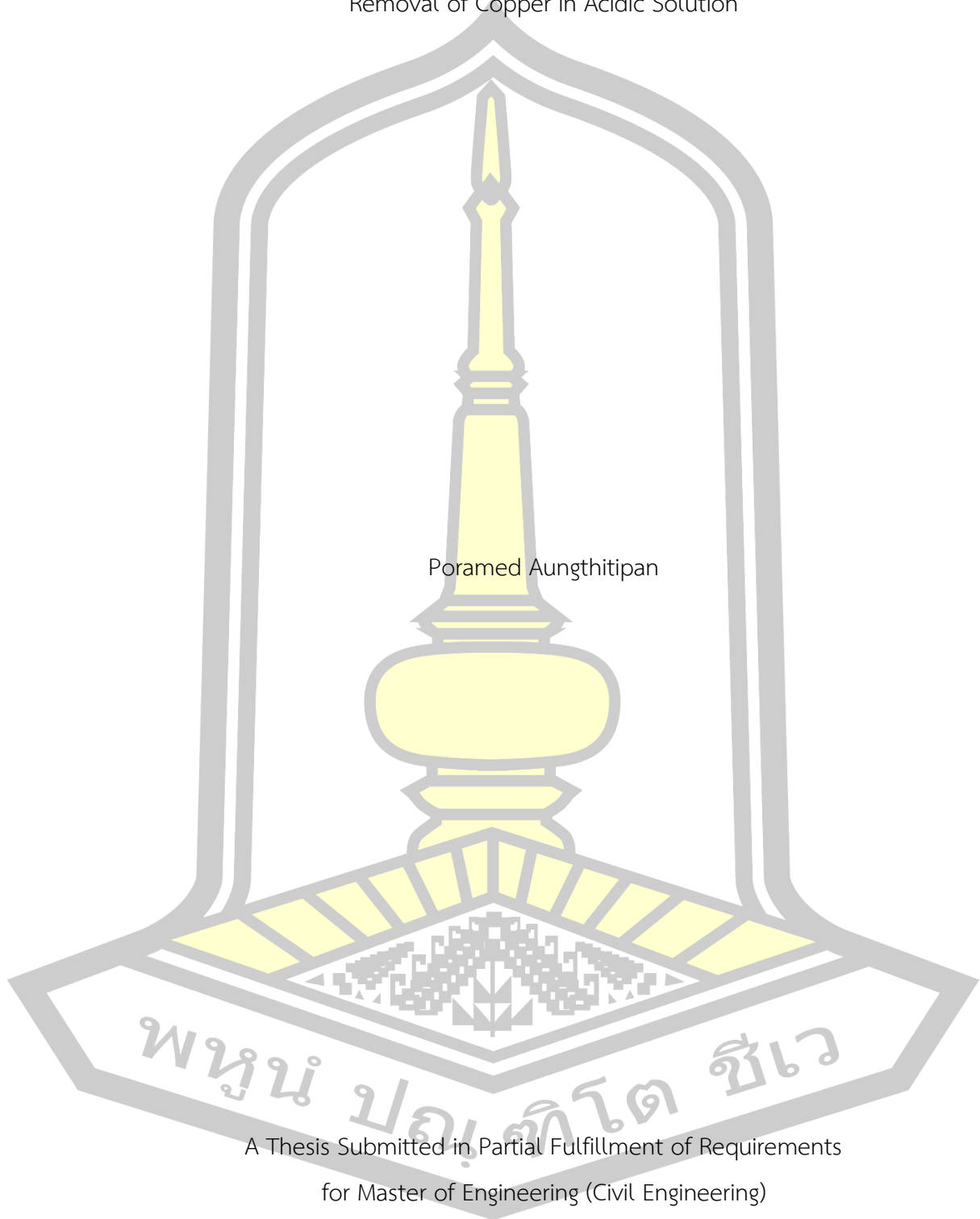
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Slow Pyrolysis of Waste Woods and Plastics for Production of Biochar and its Use for
Removal of Copper in Acidic Solution

Poramed Aungthitipan



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

June 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปรเมษฐ์ อึ้งจิติพันธ์
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. นพรัตน์ สุริยะไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. สุรัชย์ วงชาลี)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. เพชร เพ็งชัย)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาทวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การจัดทำทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์ผสมจากเศษไม้และพลาสติก เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลาย ด้วยความร้อนแบบช้า		
ผู้วิจัย	ประเมษฐ์ อึ้งธิพันธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัชย์ วงษ์ขารี		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเสนอการใช้เศษไม้ผสมขยะพลาสติกในการผลิตถ่านไบโอชาร์, ซึ่งเกิดจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 300-500 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาเปิดเผยว่าถ่านไบโอชาร์ที่เกิดขึ้นมีพื้นที่ผิวประมาณ 42.46 ตารางเมตรต่อกรัม และมีส่วนประกอบหลักคาร์บอนและออกซิเจน การทดลองพบว่ามีความสามารถในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ โดยถ่านไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ 69.24 มิลลิกรัมต่อลิตร การวิเคราะห์ตาม FL-PFO แสดงว่าสารละลายจะถูกดูดซับไว้ในช่วงแรกและขยายตัวไปที่โครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ต่อมา การศึกษาทางเทอร์โมไคนามิกพบว่าการดูดซับนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพที่ไม่เรียบเรียงและสามารถใช้ประโยชน์ได้ในการดูดซับน้ำดีและน้ำเสียเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : เศษไม้, ขยะพลาสติก, ถ่านไบโอชาร์, คาร์บอน, สารละลายคอปเปอร์, ดูดซับ

พูน ปณ จิต ชีเว

TITLE Slow Pyrolysis of Waste Woods and Plastics for Production of Biochar and its Use for Removal of Copper in Acidic Solution

AUTHOR Poramed Aungthitipan

ADVISORS Assistant Professor Surachai Wongcharee , Ph.D.

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2024
University

ABSTRACT

This study proposes the utilization of wood-plastic composite waste in producing biochar through a thermal decomposition process at temperatures ranging from 300-500 degrees Celsius. Results revealed that the produced biochar exhibited a surface area of approximately 42.46 square meters per gram, primarily composed of carbon and oxygen. Experimental findings demonstrated significant adsorption capacity for copper ions, with biochar produced at 400 degrees Celsius showing the highest adsorption efficiency at 69.24 milligrams per liter. Thermodynamic analysis according to FL-PFO indicated rapid adsorption followed by expansion into the biochar's structure. Thermodynamic studies revealed that the adsorption process is non-linear and beneficial for sustainable wastewater treatment, contributing to environmental remediation efforts.

Keyword : Woodswaste, Plasticwast, Coppercitrate, Carbon, Adsorption

พหุ ประถมศึกษา

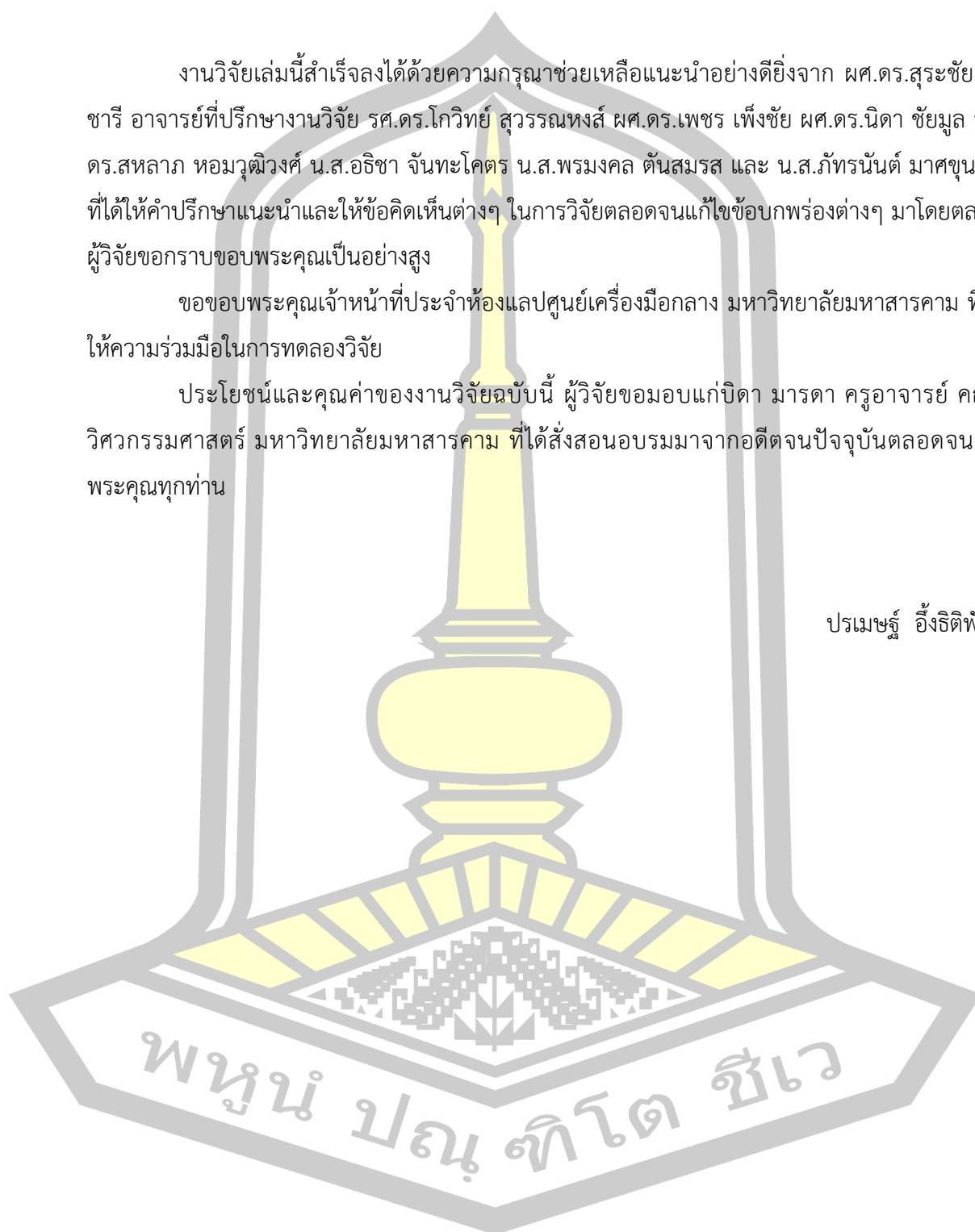
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือแนะนำอย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.สุระชัย วง
 ชารี อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย รศ.ดร.โกวิทย์ สุวรรณหงส์ ผศ.ดร.เพชร เพ็งชัย ผศ.ดร.นิตา ชัยมูล รศ.
 ดร.สพลาภ หอมวุฒิวังค์ น.ส.อิริชา จันทะโคตร น.ส.พรมงคล ตันสมรส และ น.ส.ภัทรนันต์ มาศขุนทด
 ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ มาโดยตลอด
 ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องแลปศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้
 ให้ความร่วมมือในการทดลองวิจัย

ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแก่บิดา มารดา ครูอาจารย์ คณะ
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้สั่งสอนอบรมมาจากอดีตจนปัจจุบันตลอดจนผู้มี
 พระคุณทุกท่าน

ปรเมษฐ์ อึ้งธิตินันท์

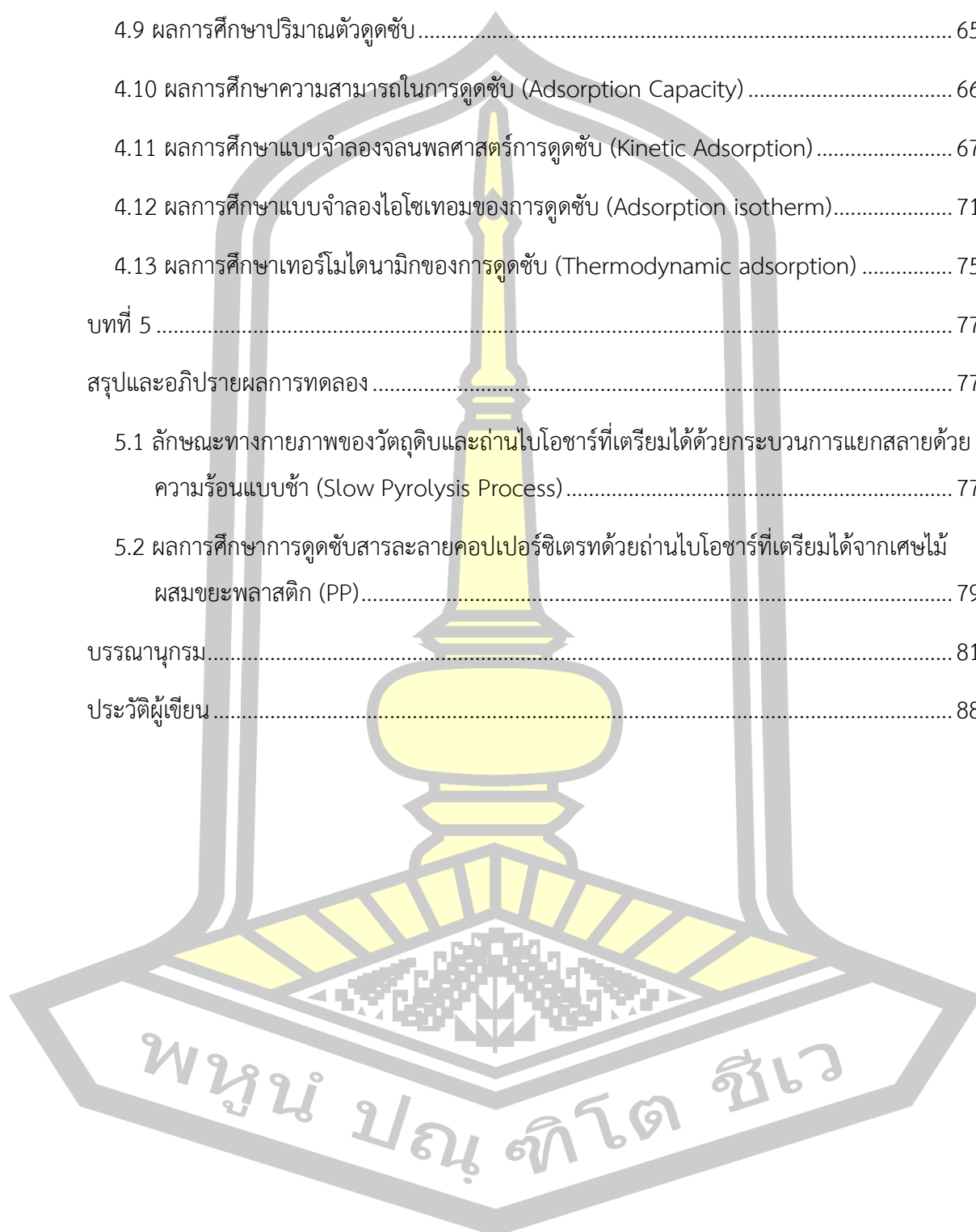


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	5
1.7 งบประมาณในการทำวิจัย.....	5
บทที่ 2	6
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ไม้ (Wood).....	6
2.2 เศษพลาสติก(Plastic waste).....	9
2.3 ถ่านไบโอชาร์ (Biochar)	13
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	15

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	16
2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherms).....	18
2.7 ชนิดของไอโซเทอม.....	23
2.8 จลพลศาสตร์ของการดูดซับ	27
2.9 ทองแดง (copper).....	30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3	37
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 สถานที่ทำการวิจัย	37
3.2 การเตรียมถ่านชาร์.....	37
3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์	40
3.4 ความสามารถในการดูดซับ.....	42
3.5 ไอโซเทอมการดูดซับ	42
3.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	43
3.7 เทอร์โมไดนามิก(Thermodynamic).....	43
บทที่ 4	45
ผลการดำเนินงาน.....	45
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า.....	45
4.2 พื้นที่ผิวและความพรุน Brunauer-Emmett-Teller (BET).....	52
4.3 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction (XRD).....	55
4.4 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR).....	56
4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติด้วย CHNS.....	61
4.7 ผลการศึกษาค่า point of zero charge (pH_{pzc}).....	62

4.8 ผลการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ	63
4.9 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ	65
4.10 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity)	66
4.11 ผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption)	67
4.12 ผลการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)	71
4.13 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับ (Thermodynamic adsorption)	75
บทที่ 5	77
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	77
5.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process)	77
5.2 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)	79
บรรณานุกรม	81
ประวัติผู้เขียน	88



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สารเคมีบางชนิดที่พบในน้ำมันชีวภาพ ที่มา [26]	16
ตารางที่ 2 Copper and copper alloy consumption in the United States by functional use in 1997 ที่มา [24]	34
ตารางที่ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP).....	55
ตารางที่ 4 ตารางแสดงลักษณะทางเคมีถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) 62	
ตารางที่ 5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP).....	69
ตารางที่ 6 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)	73
ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เปรียบด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส	76



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง.....	7
ภาพประกอบที่ 2 เศษไม้ที่เหลือใช้.....	8
ภาพประกอบที่ 3 ภาพของขยะพลาสติก.....	10
ภาพประกอบที่ 4 การสร้างขยะพลาสติกต่อหัวในบางประเทศทั่วโลกในปี 2559 (เป็นกิโลกรัมต่อปี)	11
ภาพประกอบที่ 5 การเพิ่มของขยะมูลฝอยไทย.....	12
ภาพประกอบที่ 6 ภาพกระบวนการผลิตถ่านไบโอชาร์ (Biochar).....	14
ภาพประกอบที่ 7 แบบจำลองวัฏภาคดูดซับ (adsorbed phase) ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับเมื่อดูดซับ สารที่ถูกดูดซับที่เป็นไอหรือก๊าซ.....	17
ภาพประกอบที่ 8 ไอโซเทอม Type I Isotherm.....	24
ภาพประกอบที่ 9 ไอโซเทอม Type II Isotherm.....	24
ภาพประกอบที่ 10 ไอโซเทอม Type III Isotherm.....	25
ภาพประกอบที่ 11 ไอโซเทอม Type IV Isotherm.....	26
ภาพประกอบที่ 12 ไอโซเทอม Type V Isotherm.....	26
ภาพประกอบที่ 13 ภาพของทองแดงในรูปแบบสารละลาย.....	32
ภาพประกอบที่ 14 เตาเผาไร้อากาศแบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process).....	38
ภาพประกอบที่ 15 เศษไม้เหลือใช้ (Wood) (ก่อนนำไปเผา).....	39
ภาพประกอบที่ 16 เศษพลาสติก (Plastic Waste) (ก่อนนำไปเผา).....	39
ภาพประกอบที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ ก) ขยะพลาสติกชนิดโพลีโพลีเอทิลีน ข) เศษไม้ ค) ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก ง) ถ่านไบโอชาร์ที่ถูกอบแล้ว.....	46
ภาพประกอบที่ 18 ลักษณะทางกายภาพของเศษไม้ กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x.....	47

ภาพประกอบที่ 19 ลักษณะทางกายภาพของขยะพลาสติก (PP) ที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้แล้ว กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x	47
ภาพประกอบที่ 20 ลักษณะทางกายภาพของ WP Biochar 300 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x	48
ภาพประกอบที่ 21 ลักษณะทางกายภาพของ WP Biochar 400 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x	48
ภาพประกอบที่ 22 ลักษณะทางกายภาพของ WP Biochar 500 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x	49
ภาพประกอบที่ 23 ส่วนประกอบของธาตุที่อยู่ในเศษไม้	50
ภาพประกอบที่ 24 ส่วนประกอบของธาตุที่อยู่ในขยะพลาสติก (PP)	50
ภาพประกอบที่ 25 ส่วนประกอบของธาตุที่อยู่ในถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะ พลาสติก (PP)	51
ภาพประกอบที่ 26 แบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	52
ภาพประกอบที่ 27 แบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	53
ภาพประกอบที่ 28 แบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	54
ภาพประกอบที่ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสม ขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส	56
ภาพประกอบที่ 30 โครงสร้างทางเคมีของไม้ก่อนเผา	57
ภาพประกอบที่ 31 โครงสร้างทางเคมีของขยะพลาสติก (PP)	58
ภาพประกอบที่ 32 โครงสร้างทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)	58
ภาพประกอบที่ 33 โครงสร้างทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)	59

ภาพประกอบที่ 34 โครงสร้างทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)	60
ภาพประกอบที่ 35 ลักษณะทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)	61
ภาพประกอบที่ 36 Point of zero charge (pHpzc) ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ ก) 300 องศาเซลเซียส , ข) 400 องศาเซลเซียส , และ ค) 500 องศาเซลเซียส	63
ภาพประกอบที่ 37 เวลาที่เหมาะสมในการใช้ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรท	64
ภาพประกอบที่ 38 ปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรท	66
ภาพประกอบที่ 39 ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส	67
ภาพประกอบที่ 40 จลนพลศาสตร์การดูดซับทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสม	69
ภาพประกอบที่ 41 ไอโซเทอมการดูดซับในการดูดซับทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติกที่ ก) 300 องศาเซลเซียส ข) 400 องศาเซลเซียส และ ค) 500 องศาเซลเซียส	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ภาคอุตสาหกรรมมีการเติบโตเร็วไปอย่างก้าวกระโดดซึ่งการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมทำให้มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม โลหะหนักที่ออกมาจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นเป็นอันตรายต่อชีวิตของสัตว์และมนุษย์ [1] ในการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมได้ก่อให้เกิดมลพิษหลายด้าน เช่น ทางแหล่งน้ำเนื่องจากการสะสมทางชีวภาพและมีความเป็นพิษสูง โลหะหนักกลายมาเป็นปัญหาหลัก มลพิษจำนวนมากหากปล่อยลงสู่แม่น้ำอาจเกิดกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น น้ำท่วม น้ำเน่าเสีย โดยทั่วไปน้ำเสียจะประกอบไปด้วย นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และโลหะอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ไม่อาจมีความสามารถย่อยสลายเองทางธรรมชาติได้ และความเข้มข้นของโลหะหนักเหล่านี้กระตุ้นการสะสมทางชีวภาพในสิ่งมีชีวิตอย่างสม่ำเสมอ ก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ และพืช [2] ตัวอย่างเช่น เมื่อร่างกายรับทองแดงในระดับที่ไม่เหมาะสมจะกระตุ้นการรบกวนของเยื่อเมือกอย่างมาก เกิดความเสียหายของตับ และทำให้รุนแรงขึ้นในระบบประสาท ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาเทคนิคการกำจัดโลหะหนักออกจากแหล่งน้ำอย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาอย่างจำกัดเกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของโลหะหนักและกลไกพื้นฐานของถ่านชาร์จากชีวมวลกับที่มาจากแหล่งกำเนิดสังเคราะห์ เช่น ขยะพลาสติก เศษไม้เหลือใช้ประโยชน์ จากการศึกษาการสังเคราะห์ เช่น ขยะพลาสติก จากการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านพลาสติกต้นทุนต่ำโดยใช้พลาสติกเหลือใช้โพลีเอทิลีน (Polyethylene) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) และโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) พบว่าถ่านพลาสติกยังมีโอกาสได้เป็นวัสดุดูดซับที่ยั่งยืนและกำจัดสารมลพิษจากแหล่งน้ำได้อย่างยั่งยืน สรุปได้ว่าถ่านที่ได้จากแหล่งกำเนิดอินทรีย์ เช่น วัสดุชีวมวลมีความเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกลไกการดูดซับและการลักษณะทางกายภาพ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับจะแตกต่างกันไปตามประเภท VOC ที่เปลี่ยนไป มากไปกว่านั้นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่โดดเด่นจากน้ำเสีย โดยการเพิ่มคุณสมบัติพื้นผิวและความเสถียรทางโครงสร้างของวัสดุดูดซับ เป็นต้น [3]

ประเทศไทยมีประชากรส่วนใหญ่ยังคงทำอาชีพภาคเกษตรกรรม และยังคงปลูกพืชหลากหลายชนิดตามสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย ทำให้แต่ละปี มีเศษวัสดุเหลือใช้จากการเก็บเกี่ยว หรือการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรจำนวนมากมหาศาล หรือที่เราเรียกกันว่า ชีวมวล (Biomass) ปีละหลายล้านตัน ซึ่งเป็นปริมาณมหาศาลมากที่ต้องกำจัดทิ้ง มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์จากการที่มีกระแสนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถนำเศษวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรกลับมาใช้ใหม่ โดยการแปรรูปพลังงานที่เก็บกักไว้ตามธรรมชาติ ในเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยรวมว่า ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อให้ได้พลังงานอาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่างๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน [4]

ชีวมวล (Biomass) จึงจัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy: RE) ที่สำคัญชนิดหนึ่งโดยมีการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน โดยมีแหล่งที่มาได้ 2 แหล่ง คือ เศษวัสดุจากการเกษตร และการแปรรูปอุตสาหกรรมเกษตร เพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงพลังงาน ชีวมวลที่เกิดขึ้นในพื้นที่หลังจากการเก็บเกี่ยว หรือโค่น เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย ยอดอ้อย เหว้ามันสำปะหลัง ยอดใบข้าวโพด ลำต้นข้าวโพด ใบปาล์ม ทางปาล์ม ยอดใบและลำต้นถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง ทะลายมะพร้าว ทางมะพร้าว ใบมะพร้าว ลำต้นปาล์ม ปลายไม้ ตอ ราก และกิ่งก้านไม้ยางพารา นอกจากนี้ยังมีชีวมวล ที่เกิดขึ้นในกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรม หลังแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม ปีกไม้ยางพารา ชี้เลื่อยไม้ยางพารา เศษไม้ยางพารา เปลือกมะพร้าว กาบมะพร้าว กะลามะพร้าว เปลือกมะม่วงหิมพานต์ และเศษไม้เหลือใช้ จากปริมาณชีวมวลที่เกิดขึ้นแต่ละปี ที่มีจำนวนมากมหาศาล ได้มีการนำชีวมวลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะ เศษไม้ ได้นำมาผลิตถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากชีวมวล (Biomass, วัสดุเหลือใช้จากเกษตร เช่น เหว้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว ชังข้าวโพด กิ่งไม้ และไม้ เป็นต้น) ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก (ไพโรไลซิส, Pyrolysis) ซึ่งมีสองวิธีหลักๆ คือการแยกสลายอย่างรวดเร็ว และอย่างช้า การผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 50% แต่จะใช้เวลาเป็น

ชีวโม่ง ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิเฉลี่ย 400 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) 60% แก๊สสังเคราะห์ (syngas) 20% และถ่านชีวภาพ 20% [5] ที่เราใช้ดูดซับ ซึ่งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ไม้เป็นวัสดุในการทำงานอย่างแพร่หลาย [6] จึงเล็งเห็นความสำคัญในการนำมาแปรรูปเป็นถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ที่ทำมาจากเศษไม้ที่เหลือใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับไม้ที่เหลือใช้และยังลดขยะที่เกิดจากวัสดุเหลือใช้ได้อีกด้วย

ถ่านชีวภาพ (Biochar) มีความหมายแตกต่างจากถ่านทั่วไป (Charcoal) ตรงจุดมุ่งหมายของการใช้ประโยชน์ คือเมื่อกกล่าวถึง Charcoal จะหมายถึงถ่านที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ขณะที่ Biochar คือถ่านที่ใช้ประโยชน์เพื่อกักเก็บคาร์บอนลงดินและปรับปรุงดิน [7] การกักเก็บคาร์บอนในดินด้วยการแยกสลายมวลชีวภาพด้วยความร้อนจะได้คาร์บอนถึง 50% ของคาร์บอนที่มีอยู่ในมวลชีวภาพ คาร์บอนที่ได้จากการเผาผลาญมวลชีวภาพจะเหลือเพียง 3% และจากการย่อยสลายโดยธรรมชาติหลังจาก 5-10 ปี จะได้คาร์บอนน้อยกว่า 20% ปริมาณของคาร์บอนที่ได้จะขึ้นกับชนิดของมวลชีวภาพ สำหรับอุณหภูมิจะมีผลน้อยมากถ้าอยู่ระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส [8]

ในประเทศไทยได้มีของเสียจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อะไรได้แล้ว ซึ่งส่วนใหญ่จะกำจัดโดยวิธีการฝังกลบโดย ของเสียจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมาจากกระบวนการบด สับ ย่อย พลาสติกก่อนนำไปหลอม ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้อะไรได้จึงได้นำมาเพิ่มมูลค่าให้ของเสียจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลโดยการนำมาผสมกับเศษที่กล่าวไปข้างต้นและนำไปเข้ากระบวนการเผาให้เกิดเป็นถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับของเสียจากน้ำเสีย (Wastewater) เพราะถ่านไบโอชาร์ (Biochar) มีรูพรุนซึ่งทำให้สารเคมีสามารถยึดจับกับผิวถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุคาร์บอนหลักสองชนิดที่เตรียมจากชีวมวลและพลาสติกเพื่อใช้ในการบำบัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ในสารละลายกรด โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายบทบาทของตัวดูดซับเหล่านี้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักอย่างมีประสิทธิภาพจากตัวกลางที่เป็นน้ำที่ปนเปื้อน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบ กลุ่มฟังก์ชันของพื้นผิว และสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนัก แต่การใช้งานถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติกยังคงมีการศึกษาเป็นจำนวนน้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมถ่านไบโอชาร์จากเศษไม้และพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้และพลาสติกที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงสังเคราะห์ในสารละลายกรดจากถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติกที่จากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลนั้น น่าจะมีคุณสมบัติเป็นคาร์บอน
- 1.3.2 ถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลมีความสามารถจับทองแดง (Cu) ที่ปนเปื้อนกับน้ำเสียได้
- 1.3.3 สามารถนำเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อดูดจับทองแดง (Cu) ได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 เศษไม้ที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ พลาสติกของเสียจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล
- 1.4.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา คือ 300 400 และ 500
- 1.4.3 เวลาที่ใช้ในการเผา คือ 1 ชั่วโมง
- 1.4.4 ลักษณะสมบัติของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ (Biochar) ที่ศึกษาได้แก่ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ลักษณะโครงสร้างทางเคมีและกายภาพ
- 1.4.5 ทองแดงที่ใช้ศึกษาเป็นทองแดงสังเคราะห์ที่ได้สารจากสารละลายกรด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถนำเศษไม้ที่เหลือใช้และขยะพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกกรีซเคลมาแปรรูปเป็นถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ซึ่งทำให้มีมูลค่าสูงขึ้นได้
- 1.5.2 สามารถนำถ่านไบโอชาร์ (Biochar) มาบำบัดน้ำเสียที่มีทองแดง (Cu)ปนเปื้อนได้

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรจำเพาะของรูพรุน ดำเนินการที่ ตึกศูนย์เครื่องมือกลาง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การถ่ายภาพของถ่านชาร์ที่ทำจากไม้ผสมพลาสติกที่เตรียมถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบ
ส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ดำเนินการที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.7 งบประมาณในการทำวิจัย

งบประมาณในการทำงานวิจัยครั้งนี้ 15,000 บาท (หนึ่งหมื่นห้าพันบาทถ้วน)



บทที่ 2

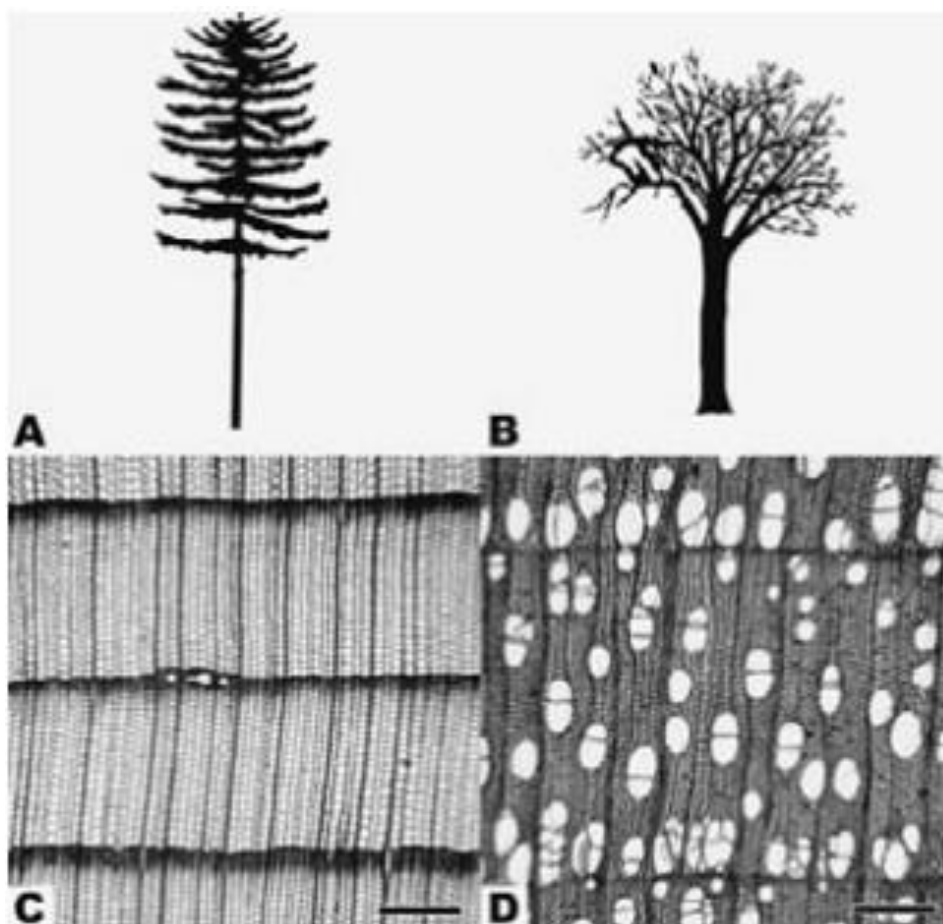
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไม้ (Wood)

ไม้เป็นวัสดุที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการสร้างและอุตสาหกรรมการก่อสร้างและเป็นทรัพยากรอย่างเดียวยังยืนอย่างแท้จริงเนื่องจากโครงสร้างทางธรรมชาติของมัน [9] มนุษย์จึงได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในสมัยยุคปี 80 จนมาถึงปัจจุบัน ไม้สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ประโยชน์อย่างหนึ่งคือ ใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหรือฟืน บางครั้งก็ใช้ในงานศิลปะทำเฟอร์นิเจอร์ ทำอาวุธ หรือเป็นวัสดุก่อสร้าง ไม้ยังคงเป็นส่วนประกอบสำคัญในการก่อสร้าง ตั้งแต่มนุษย์เริ่มสามารถสร้างบ้านที่อยู่อาศัย หรือเรือ โดยเรือแทบทุกลำในช่วงปี 80 ทำมาจากไม้แทบทั้งสิ้น ซึ่งในปัจจุบันบ้านหรือเรือที่ทำจากไม้ เริ่มมีจำนวนลดลง โดยปัจจุบันมีการนำวัสดุอื่นมาใช้สร้างแทน แต่ว่าไม้ยังคงมีส่วนสำคัญในด้านการเสริมโครงสร้าง หรือวัสดุเสริมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างหลังคา และของประดับนอกบ้าน ไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้างรู้จักกันในชื่อ ไม้แปรรูป [3] โดยไม้แปรรูปได้เป็น 2 ประเภท คือ ไม้ธรรมชาติหรือไม้จริง (natural wood or solid wood) และ ไม้ประกอบ (processed wood) ไม้ธรรมชาติหรือไม้จริง (natural wood or solid wood) คือ ไม้ที่ได้มาจากลำต้นของต้นไม้โดยตรง แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) และ ไม้เนื้ออ่อน (softwood)

2.1.1 ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [10]

หากต้องการให้คำจำกัดความในพฤกษศาสตร์ ไม้เนื้ออ่อนคือไม้ที่มาจากต้นยิมโนสเปิร์ม (ส่วนใหญ่ต้นสน) และไม้เนื้อแข็งเป็นไม้ที่มาจากพืชดอก (พืชดอก) ในเขตอบอุ่นของซีกโลกเหนือ โดยทั่วไปแล้วไม้เนื้ออ่อนมักเป็นต้นไม้เข้มน้ำที่เขียวชอุ่มตลอดปี เช่น ไม้สน และไม้สปรูซ ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งมักเป็นไม้ใบกว้าง ผลัดใบ ต้นไม้ เช่น เมเปิ้ล และต้นเบิร์ช ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งไม่เพียงแตกต่างกันเท่านั้น เงื่อนไขของประเภทของต้นไม้ที่ได้มา แต่ก็แตกต่างกันในแง่ของพวกเขา เซลล์ส่วนประกอบ ความแตกต่างที่สำคัญที่สุดเพียงอย่างเดียวระหว่างไม้ทั่วไปสองชนิดก็คือ ไม้เนื้อแข็งมีลักษณะเฉพาะของเซลล์ที่เรียกว่าองค์ประกอบภาชนะ(หรือรูขุมขน) ในขณะที่ไม้เนื้ออ่อน ขาดสิ่งเหล่านี้ (ภาพประกอบที่ 1) ความคล้ายคลึงกันของเซลล์ที่สำคัญระหว่างไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งก็คือ



ภาพประกอบที่ 1 ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง
ที่มา [10]

โดย

ภาพ A คือ ลักษณะทั่วไปของไม้เนื้ออ่อนทั่วไป

ภาพ B คือ ลักษณะทั่วไปของไม้เนื้อแข็งทั่วไปภาพ C คือ ส่วนตามขวางของเนื้อไม้เนื้ออ่อน พื้นที่สีขาวคือคลองเรซิน และภาพ D คือ ส่วนตามขวางของไม้เนื้อแข็ง ซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งทั่วไป ในเนื้อทั้งสองชนิด เซลล์ส่วนใหญ่ตายเมื่อแก่เต็มที่ แม้แต่ในกระพี้ ซึ่งเซลล์นั้น เซลล์ที่มีชีวิตอยู่เมื่อโตเต็มที่เรียกว่าเซลล์พาเรงคิมา และพบได้ทั้งในป่าเนื้ออ่อนและไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง นอกจากนี้ แม้ว่าใครจะสรุปตามชื่อ แต่ก็ไม่ใช่ไม้เนื้ออ่อนทั้งหมด มีไม้เนื้ออ่อนน้ำหนักเบาและไม้เนื้อแข็งทั้งหมดไม่มีไม้เนื้อแข็งและหนัก



ภาพประกอบที่ 2 เศษไม้ที่เหลือใช้
ที่มา [11]

2.1.2 ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood)

เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้ที่มีใบกว้าง ซึ่งเป็นส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในป่าของประเทศไทย ต้นไม้ต้องมีอายุหลายสิบปีจึงจะนำมาใช้งานได้ ดังนั้นจึงเป็นไม้ที่มีวงแคบและมากกว่าไม้เนื้ออ่อน เนื่องจากเจริญเติบโตช้ากว่า ลักษณะทั่วไปของไม้เนื้อแข็งจะมีเนื้อมัน ลายเนื้อไม้ละเอียด มีน้ำหนักมาก เนื้อแน่น สีเข้ม(แดงถึงดำ) แข็งแรงทนทาน เช่น ไม้เต็ง ไม้แดง ไม้ประดู่ ไม้มะค่า ไม้ตะเคียน

2.1.3 ไม้เนื้ออ่อน (Softwood)

เป็นเนื้อไม้ที่ได้จากต้นไม้พวกสนที่มีใบเรียวยาวเล็ก ส่วนเจริญเติบโตบริเวณที่สูงอากาศเย็น เป็นไม้ที่มีวงกว้าง เนื่องจากเติบโตเร็ว ลำต้นใหญ่ เนื้อไม้ค่อนข้างเหนียว น้ำหนักเบา ใช้งานง่าย แต่

เนื้อไม้ไม่แข็งแรงมากจึงรับน้ำหนักได้ไม่ดี เนื้อไม้มีแต่สีจางอ่อนไปถึงสีเข้ม เช่น ไม้สัก ไม้ยาง ไม้ฉำฉา ไม้จำปา ไม้มะม่วง ไม้ขนุน [12]

2.2 เศษพลาสติก(Plastic waste)

การปนเปื้อนของพลาสติกในสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติได้ดึงดูดได้รับความสนใจจากนักวิจัย และประชาชนทั่วไปหรือเข้าไปพัวพันกับพลาสติกได้ การผลิตและการบริโภคพลาสติกทั่วโลกเพิ่มขึ้นที่ อัตราที่น่าตกใจในช่วงสองสามทศวรรษที่ผ่านมา การสะสมของการแพร่หลายและพลาสติกที่ทิ้งถาวรได้ เพิ่มขึ้นพร้อมกันในหลุมฝังกลบและสิ่งแวดล้อม ปัญหาทางสังคม นิเวศวิทยา และเศรษฐกิจของขยะ พลาสติกมลพิษ [13] จากกระบวนการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกจากกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก จะยังคงมี เศษพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการ สับ ย่อย พลาสติกก่อนนำไปหลอม ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ ประโยชน์อะไรได้โดยทั่วไปมักกำจัดโดยวิธีการฝังกลบเท่านั้น

2.2.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์หรือกึ่งสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีราคาถูก น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน และทนต่อการกัดกร่อน พวกเขามักจะเปราะแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยและย่อยสลาย ต่อไปในที่สุดเมื่อสัมผัสกับรังสีUV ไม่ว่าจะโดนแสงแดดโดยตรงหรือน้ำทะเล อย่างไรก็ตาม เวลา จจริงที่พลาสติกใช้ย่อยสลายในสิ่งแวดล้อมยังไม่ทราบแน่ชัด [14] ด้วยจำนวนพลาสติกมากกว่า 8 ล้าน ตันที่ลงสู่มหาสมุทรในแต่ละปี มนุษยชาติจึงต้องคิดใหม่อย่างเร่งด่วนเกี่ยวกับวิธีที่เราผลิตและใช้ พลาสติก เพื่อไม่ให้ขยะเหล่านี้กลายเป็นขยะตั้งแต่แรก

พลาสติกราคาถูก เบา และอเนกประสงค์เป็นวัสดุที่โดดเด่นของเศรษฐกิจสมัยใหม่ของ เรา การผลิตของพลาสติกเหล่านี้คาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในอีกสองทศวรรษข้างหน้า อย่างไรก็ตาม มีเพียง 14% ของบรรจุภัณฑ์พลาสติกทั้งหมดเท่านั้นที่ถูกรวบรวมเพื่อนำไปรีไซเคิลหลังการใช้ งาน และปริมาณมหาศาลหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่เพียงส่งผลให้เศรษฐกิจโลกสูญเสียมูลค่า 80,000 ล้านถึง 120,000 ล้านดอลลาร์ต่อปี แต่หากแนวโน้มปัจจุบันยังคงดำเนินต่อไป อาจจะมี พลาสติกมากกว่าปลาตามน้ำหนักในมหาสมุทรภายในปี 2593 [15]

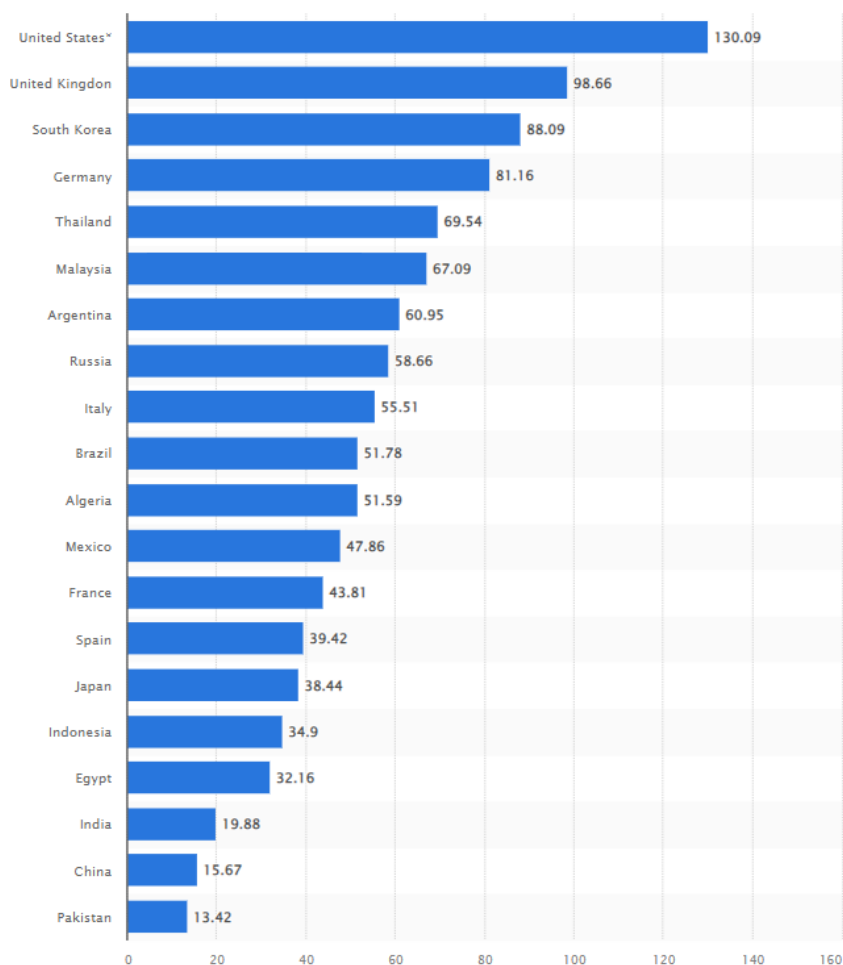


ภาพประกอบที่ 3 ภาพของขยะพลาสติก

2.2.2 ที่มาของขยะพลาสติก

สหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำของโลกในการสร้างขยะพลาสติก โดยผลิตขยะพลาสติกปีละ 42 ล้านเมตริกตัน [16] การสร้างขยะพลาสติกต่อหัวในสหรัฐอเมริกานั้นสูงกว่าประเทศอื่นๆ โดยคนอเมริกาโดยเฉลี่ยผลิตขยะพลาสติก 130.09 กิโลกรัมต่อปี ประเทศที่มีรายได้สูงอื่นๆ เช่นประเทศกลุ่ม EU-28 (การผลิตขยะพลาสติกต่อหัวต่อปี 58.56 กก.) ก็มีอัตราการสร้างขยะพลาสติกต่อหัวสูงเช่นกัน ประเทศที่มีรายได้ต่ำบางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น (ต่อปีต่อการสร้างทุน 38.44 กก.) ผลิตขยะพลาสติกต่อหัวน้อยกว่ามาก [17]

ของเสียพลาสติกที่รวบรวมจากบ้านเรือน โรงแรม ภัตตาคาร โรงพยาบาล ร้านค้า สำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม โดยเป็นพลาสติกหรือชิ้นส่วนที่ใช้งานแล้ว หรือเสื่อมสภาพไม่สามารถใช้งานได้หรือไม่เป็นที่ต้องการใช้อีกต่อไป โดยไม่มีการแยกประเภทของพลาสติก หรือปะปนกับวัสดุอื่น หรือ สกปรกปนเปื้อน ตัวอย่างขยะพลาสติก เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก ฝาขวดน้ำ แก้วพลาสติก กล่องโฟม เชือกฟาง หลอดดูดพลาสติกเคลือบฟอยล์ ถุงขนม และ ถุงก๊อบแก๊บ โดยไม่มีการคัดแยก รวมทั้ง พลาสติกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste) หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนสารอันตราย วัตถุอันตราย [18]

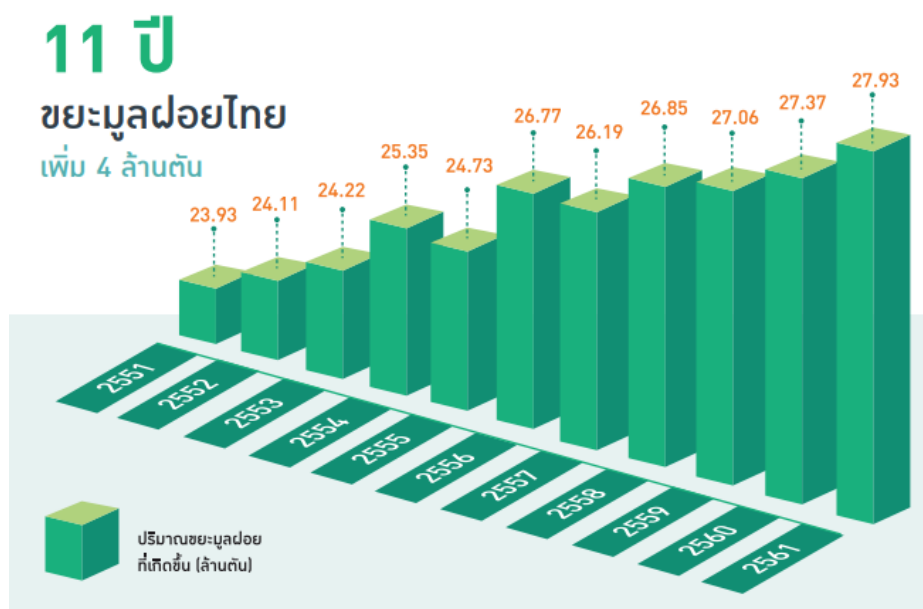


ภาพประกอบที่ 4 การสร้างขยะพลาสติกต่อหัวในบางประเทศทั่วโลกในปี 2559 (เป็นกิโลกรัมต่อปี)
ที่มา [18]

2.2.3 ขยะพลาสติกในไทย

ข้อมูลจากกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในช่วงสิบปี (ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2561) นอกจากปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นจาก 24.11 ล้านตัน เป็น 27.93 ล้านตัน ปริมาณขยะพลาสติกก็เพิ่มขึ้นทุกปีโดยในปี พ.ศ. 2561 คิดเป็น 12% ของขยะมูลฝอย หรือประมาณ 2 ล้านตันโดย 1.2 ล้านตัน เป็นถุงพลาสติก ส่วนที่เหลือเป็นพลาสติกชนิดอื่นๆ เช่น กล่อง ถาด ขวด ฝาจุก สำหรับขยะพลาสติก มีเพียง 25% เท่านั้นที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ที่เหลือ 75% เป็นขยะพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (single use plastics) อย่างถุงใส่อาหาร ถุงหิ้ว แก้วพลาสติก กล่อง

พลาสติก กล่องโฟม ฯลฯ แสดงให้เห็นว่า แม้พลาสติกจะมีอายุยาวนาน แต่กลับมีอายุการใช้ที่สั้นมาก โดยถูกทิ้งเป็นขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 5 การเพิ่มของขยะมูลฝอยไทย
ที่มา [19]

2.2.4 มลภาวะจากพลาสติก

การสะสมของวัตถุและอนุภาคพลาสติก (เช่น ขวดพลาสติก ถัง และ ไมโครบีดส์) ในสภาพแวดล้อมของโลก ซึ่งส่งผลเสียต่อ มนุษย์ สัตว์ป่า และที่อยู่อาศัย ของพวกมัน[20] พลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นมลพิษถูกจัดประเภทตามขนาดเป็นเศษเล็กน้อย เมโซหรือเศษซากขนาดใหญ่ พลาสติกมีราคาไม่แพงแถมยังทนทาน ทำให้สามารถปรับให้เข้ากับการใช้งานแตกต่างกันได้ ส่งผลให้ผู้ผลิตเลือกใช้พลาสติกมากกว่าวัสดุอื่นๆ [21] อย่างไรก็ตาม โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกส่วนใหญ่ทำให้ทนทานต่อกระบวนการย่อยพลาสติกทนทานต่อกระบวนการย่อยสลาย ตามธรรมชาติหลายอย่าง และเป็นผลให้พลาสติกย่อยสลาย ตามธรรมชาติหลายอย่าง และเป็นผลให้พลาสติกย่อยสลายได้ช้า เมื่อรวมกันแล้ว ปัจจัยทั้งสองนี้ทำให้พลาสติกปริมาณมากเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของขยะที่มีการจัดการที่ไม่ถูกต้องและยังคงอยู่ในระบบนิเวศ

2.3 ถ่านไบโอชาร์ (Biochar)

ถ่านไบโอชาร์ (Biochar) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวลหรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น ต้นไม้ เศษใบไม้ กิ่งไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ตอซัง หรือมูลสัตว์ เป็นต้น กระบวนการการย่อยสลายเชิงความร้อนนี้ เรียกว่า ไพโรไลซิส (Pyrolysis) [22] ถ่านชีวภาพ (biochar) หรือเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล (Biomass) ที่ได้รับการเผาไหม้ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนในกระบวนการที่มีการควบคุมสภาวะการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกการเผาไหม้ดังกล่าวว่า กระบวนการไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพทั่วไปมีปริมาณคาร์บอนในองค์ประกอบที่สูง โดยทั่วไป 50% ในองค์ประกอบทั้งหมดของถ่านชีวภาพเนื่องจากมีองค์ประกอบของคาร์บอนมาก ทำให้ถ่านชีวภาพเป็นเสมือนแหล่งกักเก็บคาร์บอน ช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศได้ อีกทั้งถ่านชีวภาพยังมีรูพรุนถ่านไบโอชาร์ (Biochar) สามารถนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนมาในน้ำเสียได้โดยเฉพาะสารที่เป็นพิษ สารจำพวกโลหะและสารประกอบอินทรีย์ คุณสมบัติถ่านไบโอชาร์ (Biochar) มีคุณสมบัติดูดซับและดูดติดผิว ในการศึกษาพบว่าผงไม้ (Sugi) คาร์บอนโซ่ที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักออกได้ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และปรอท โดยผงถ่านที่ 200 600 และ 1000 องศาเซลเซียส กำจัดปรอทในช่วงความเข้มข้น 1-10 ppm ส่วนถ่านชาร์ (Charcoal) ที่ทำจากไม้ที่อุณหภูมิต่างกันยังพบว่าสามารถดูดซับธาตุอินทรีย์ได้ เช่น ไนโตรเจน [23]

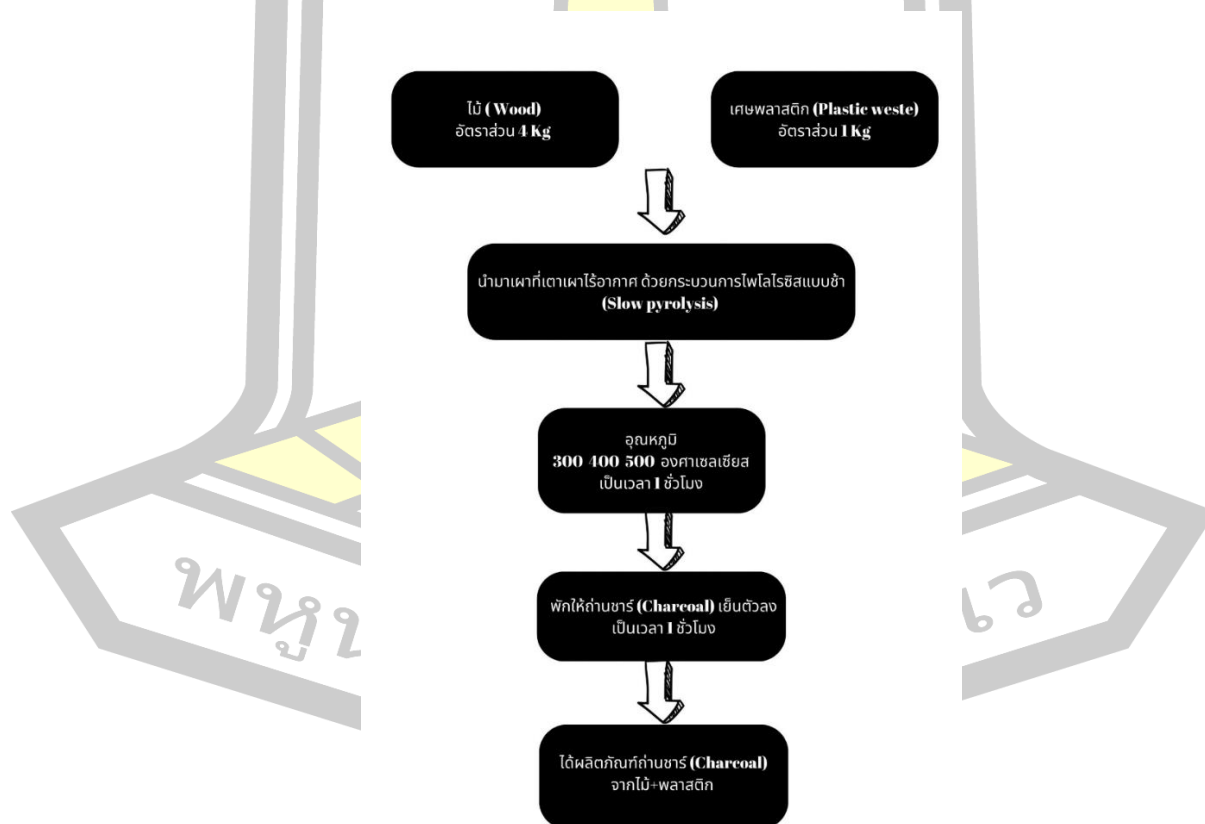
2.3.1 ลักษณะของถ่านชาร์ไบโอชาร์ (Biochar)

ถ่านไบโอชาร์ (Biochar) มีลักษณะเป็นรูพรุน มีองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และซีลีเนียม แต่องค์ประกอบจะเปลี่ยนตามชนิดของชีวมวลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น อุณหภูมิ อุณหภูมิ และระยะเวลา เป็นต้น [24]

2.3.2 การผลิตถ่านไบโอชาร์ (Biochar)

สามารถผลิตได้ในขนาดเล็กโดยใช้เตาหรือเตาเผาตัดแปลงที่มีต้นทุนต่ำ หรือผ่านการผลิตขนาดใหญ่ที่ใช้ต้นทุนสูง ซึ่งใช้ในโรงงานไพโรไลซิสนาขนาดใหญ่ขึ้นและวัตถุดิบตั้งต้นในปริมาณที่มากขึ้น ถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบชีวมวลหลายชนิดผ่านกระบวนการไพโรไลซิสตามที่กล่าวข้างต้น สร้างน้ำมันและก๊าซเป็นผลพลอยได้ ขยะแห้งที่ได้มาจะถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้เหลือน้อยกว่า 3 cm ก่อนนำไปใช้ วัตถุดิบจะถูกให้ความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น 350-

700 องศาเซลเซียส โดยทั่วไป ไพโรไลซิสจะจำแนกตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน ไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส และโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นตามลำดับวินาที (อัตราให้ความร้อนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียส/นาติ) เงื่อนไขนี้ทำให้การผลิตถ่านไบโอชาร์ (Biochar) เพิ่มขึ้นสูงสุด ในทางกลับกันกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามักใช้เวลามากกว่าตั้งแต่ 30 นาที ถึง 2-3 ชั่วโมง เพื่อให้วัตถุดิบดำเนินการไพโรไลซิสเต็มที่ (อัตราการให้ความร้อนจะมากกว่าหรือเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส/นาติ) และในขณะเดียวกันก็ได้ผลผลิตถ่านชีวภาพมากขึ้น ช่วงอุณหภูมิยังคงที่อยู่ที่ 250-500 องศาเซลเซียส ประเภทของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับสองตัวแปร คือ มวลชีวภาพที่ใช้ อุณหภูมิ และอัตราการให้ความร้อนสูงและต่ำ มีผลอย่างชัดเจนต่อผลผลิตของถ่าน สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำถ่านชีวภาพมีโครงสร้างคาร์บอนอสัณฐานที่มีกลิ่นหอมต่ำกว่าถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิสูงทำให้ผลผลิตถ่านลดลงในปฏิกิริยาไพโรไลซิสทั้งหมด รายงานผลของระยะเวลาในการเกิดถ่านต่อผลผลิตของถ่านไบโอชาร์ (Biochar) ผลผลิตจะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน กระบวนการไพโรไลซิสส่งผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพถ่าน [25]



ภาพประกอบที่ 6 ภาพกระบวนการผลิตถ่านไบโอชาร์ (Biochar)

2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือกระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงยาที่ใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูง ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้สารตั้งต้น ชนิดของปฏิกรณ์ เป็นต้น

กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น สองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

2.4.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อน (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียส/นาทีก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 mm ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้า มีสัดส่วนเป็นของเหลว 30-50% และ ถ่าน 25-35% ไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ใช้ให้ความร้อนในระยะเวลาสั้น โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์ เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15-30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้ง 3 สถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขี้ หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น [26]

2.4.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400-650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000

องศาเซลเซียส/วินาที) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีต่ำกว่า 2 mm มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลว เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ ประมาณ 60-75% ของแข็ง 15-25% และมีองค์ประกอบของไนโตรเจนในน้ำมันชีวภาพ 10-30% ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบด้วยสารอื่นๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน และทำปฏิกิริยาของเซลล์ลูโลส เฮมิเซลล์ลูโลส และลิกนินในชีวมวล องค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพจากวัตถุดิบประเภทชีวมวล แสดงดังตารางที่ 2-1 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นน้ำมันชีวภาพได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจึงสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีที่ได้หลายประเภท โดยสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวภาพกว่า 3,000 ชนิด [27]

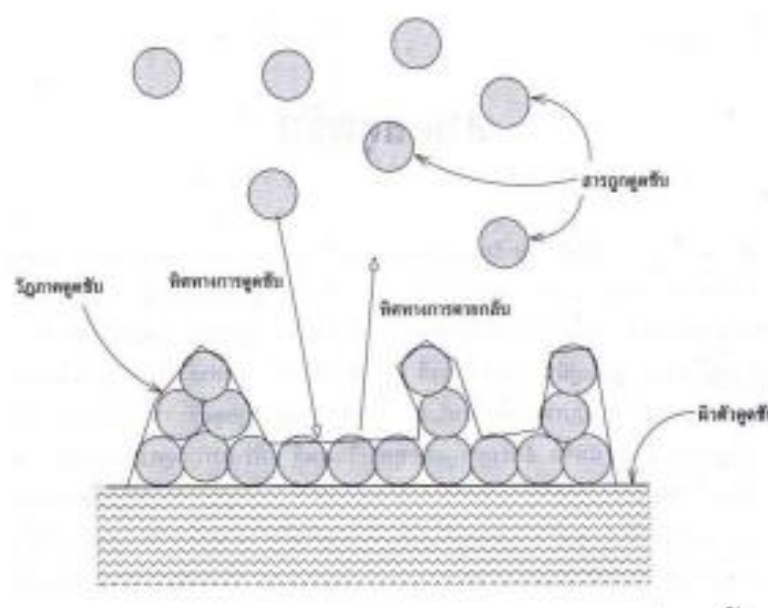
ตารางที่ 1 สารเคมีบางชนิดที่พบในน้ำมันชีวภาพ ที่มา [26]

Cellulose/Hemicellulose Derived Compound	Lignin-derived Compound	Common derivatives
Levogluconan	Isoeugenol	Char
Hydroxyacetaldehyde	2,6-dimethoxyphenol	Water
Acetic acid	Phenol	CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₈
Acetol	4-ethyl phenol	
Furfural	2-ethyl phenol	
Furfuryl alcohol	p-cresol	
Cellobiosan	o-cresol	
2-methyl-2- Cyclopenten-1-one	m-cresol	
3-methyl-2- Cyclopenten-1-one		

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของสารที่ส่วนต่อประสานของสองเฟส เช่น ของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง หรือของเหลว-อินเทอร์เฟซที่

มันคง สารที่ถูกดูดซับคือตัวดูดซับและตัวดูดซับวัสดุนี้เรียกว่าตัวดูดซับ คุณสมบัติของตัวดูดซับและตัวดูดซับคือค่อนข้างเฉพาะเจาะจงและขึ้นองค์ประกอบ ส่วนประกอบของตัวดูดซับได้แก่ รับผิดชอบหลักในการกำจัดสารมลพิษใดๆ ออกจากน้ำเสีย [28]



ภาพประกอบที่ 7 แบบจำลองวัฏภาคดูดซับ (adsorbed phase) ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับเมื่อดูดซับสารที่ถูกดูดซับที่เป็นไอหรือก๊าซ
ที่มา [29]

2.5.1 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว

2.5.2 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการอาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงมากระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดย้อนกันได้หลายชั้น โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2.5.3 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

ข้อมูลเกี่ยวกับสมดุลการดูดซับเป็นหนึ่งในสิ่งสำคัญ ปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบตัวดูดซับอย่างเหมาะสม ระบบดูดซับในช่วงหลายปีที่ผ่านมามีการใช้แบบจำลองเพื่ออธิบายสมดุลการดูดซับ รวมถึงโมเดลไอโซเทอรั่มพารามิเตอร์สองและสามตัว เหล่านี้แบบจำลองไอโซเทอรั่มแสดงหลักฐานที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับคุณสมบัติการดูดซับของระบบดูดซับและข้อมูลการกระจายตัวของไซต์ที่แลกเปลี่ยนได้บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ รายการของแบบจำลองต่างๆที่ใช้โดยผู้แต่งที่แตกต่างกัน

2.6 ไอโซเทอรั่มการดูดซับ (Adsorption Isotherms)

ในระบบของแข็ง-ของเหลว การดูดซับจะส่งผลให้เกิดการจัดตัวถูกละลายออกจากสารละลายและสะสมอยู่ที่ผิวของแข็ง ตัวละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายถึงสมดุลไดนามิกโดยดูดซับบนเฟสของแข็ง จำนวนของตัวดูดซับที่สามารถถูกดูดซับโดยตัวดูดซับตามฟังก์ชันของอุณหภูมิทั้งสองและความเข้มข้นของตัวดูดซับและกระบวนการที่อุณหภูมิทั้งสองและความเข้มข้นของตัวดูดซับและกระบวนการที่อุณหภูมิคงที่ได้อธิบายโดยไอโซเทอรั่มการดูดซับตามสมการทั่วไป

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2.1)$$

โดยที่ q_t คือ ปริมาณตัวของตัวดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา
 C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น
 C_t คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับตามลำดับ

V คือ ปริมาตรของสารละลาย

m คือ มวลของตัวดูดซับ

2.6.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

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

2.6.1.1 ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

2.6.1.2 โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน

2.6.1.3. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ไม่มีแรงระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

2.6.1.4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นชั้นเดียวเท่านั้น สมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = q_m \cdot k_1 \frac{C_e}{1 + k_1 \cdot C_e} \quad (2.2)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณ MB ที่ดูดซับสมดุล (mg/g^{-1})

q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g^{-1})

k_1 คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$R_L = \frac{1}{1 + k_f \cdot C_0} \quad (2.3)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$RL = \frac{1}{1 + bC_e} \quad (2.4)$$

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

2.6.2 ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิส (Freundlich isotherm)

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

$$q_e = k_f \cdot C_e^{\frac{1}{n_f}} \quad (2.5)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

k_f คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n_f คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำค่า $\frac{1}{n}$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับถ้าน้อยกว่า 1 และอธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

2.6.3 ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm)

แบบจำลองแบบทอธเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองฮอลแลงเมียร์ และสามารถใช้ได้ทั้งระบบที่มีความดันต่ำและความดันสูง

$$q_e = q_m \frac{k_{th} \cdot C_e}{\left[1 + (k_{th} \cdot C_e)^{n_{th}}\right]^{\frac{1}{n_{th}}}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)
	q_m	คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/L)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
	k_{th}	คือ ค่าคงที่แบบจำลองไอโซเทอมของทอธ
	n_{th}	คือ เลขยกกำลังของแบบจำลองไอโซเทอมทอธ ($0 < n_{th} \leq 1$)

2.6.4 ไอโซเทอมแบบเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm)

แบบจำลองของเรดลิค-เพเทอร์สันเป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานของแลงเมียร์และฟรอนดิส ดังนั้นกลไกการดูดซับจึงเป็นการผสมผสาน แบบจำลองนี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวในอุดมคติ

$$q_e = \frac{q_m \cdot k_k \cdot C_e}{(1 + k_k \cdot C_e)^{a_k}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)
	q_m	คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/L)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
	k_k	คือ เลขชี้กำลังแบบจำลองไอโซเทอร์มของเพเทอร์สัน
	a_k	คือ ค่าคงที่แบบจำลองไอโซเทอร์มของเพเทอร์สัน

2.6.5 ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm)

แบบจำลองของหลิวเป็นแบบจำลองที่ได้จากการรวมกันของแลงเมียร์และฟรุนดิส แต่สมมติฐานของแบบจำลองแลงเมียร์และสมมติฐานการดูดซับที่ไม่มีที่สิ้นสุดของแบบจำลองของฟรุนดิสจะถูกทิ้งไป แบบจำลองของหลิวคาดการณ์ว่าตำแหน่งของตัวดูดซับไม่สามารถมีพลังงานเท่ากันได้

ดังนั้นตัวดูดซับจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันที่โมเลกุลต้องการยึดเกาะ อย่างไรก็ตาม ความอึดตัวของตำแหน่งตัวดูดซับควรเกิดขึ้นแตกต่างจากแบบจำลองฟรุนดิส

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

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)
	q_m	คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/L)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
	k_{th}	คือ ค่าคงที่แบบจำลองไอโซเทอมของทอร์

2.6.6 ไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm)

สมการของเทมคินเป็นการอธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งถูกพัฒนามาจากกระบวนการที่ การเปลี่ยนแปลงของความร้อนในการดูดซับ และมีรูปแบบสมการ (2.10) และ (2.11)

$$q_e = b_t \cdot \ln(k_t \cdot C_e) \quad (2.9)$$

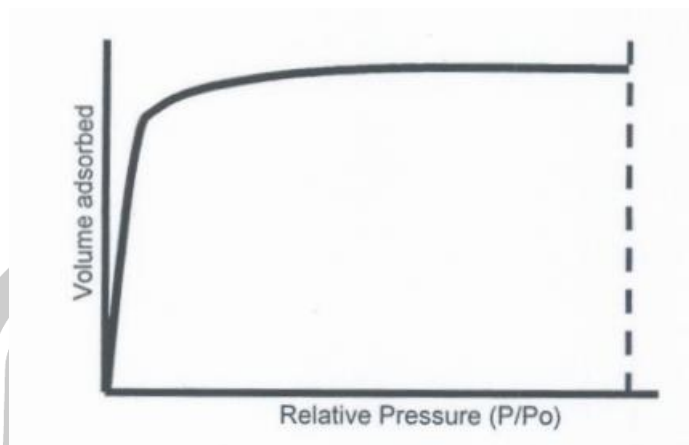
เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)
	b_t	คือ ค่าคงที่ของอุณหภูมิเทมคินที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ (J mol ⁻¹)
	K_T	คือ ค่าคงที่สมดุล (kJ/mg)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

2.7 ชนิดของไอโซเทอม

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของตัวถูกดูดซับไว้ ณ ความดันย่อยหนึ่งๆ ที่อุณหภูมิคงที่โดยมีการแบ่งประเภทไอโซเทอมของการดูดซับออกเป็น 5 แบบ คือ [30]

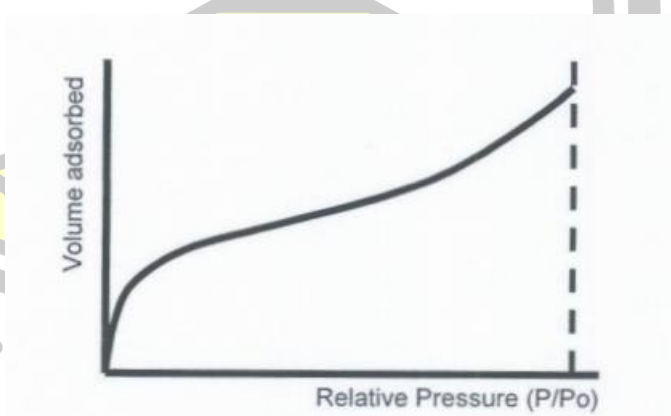
2.7.1 Type I Isotherm พบมากที่สุดเป็นการดูดซับโดยชั้นของตัวดูดซับคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียง 1 โมเลกุล (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous Powder ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่ความดันสัมพันธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพันธ์สูง ๆ เข้าใกล้ P_s จะมีการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

พหุ ประสิทธิภาพ



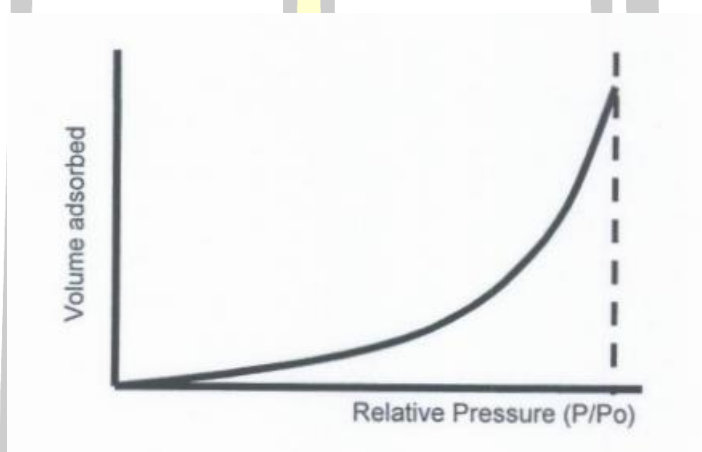
ภาพประกอบที่ 8 ไอโซเทอม Type I Isotherm
ที่มา [30]

2.7.2 Type II Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าใกล้อินฟินิต) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative pressure จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multilayer



ภาพประกอบที่ 9 ไอโซเทอม Type II Isotherm
ที่มา [30]

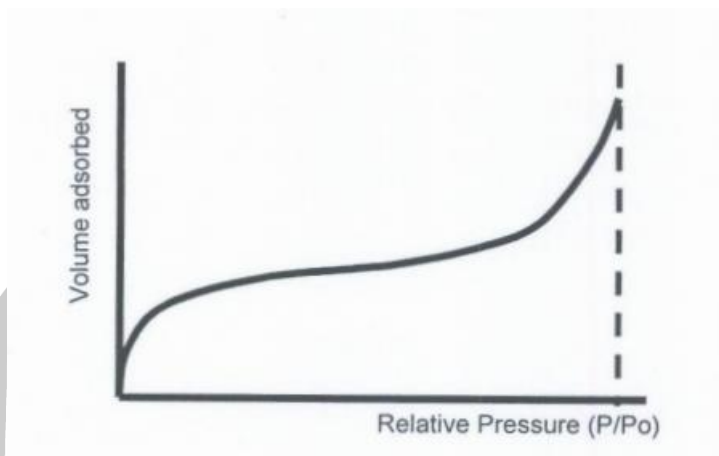
2.7.3 Type III Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ โดยจะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น คล้าย Type II แต่การดูดซับที่เพิ่มขึ้น จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมผัสที่มีค่าสูง



ภาพประกอบที่ 10 ไอโซเทอม Type III Isotherm ที่มา [30]

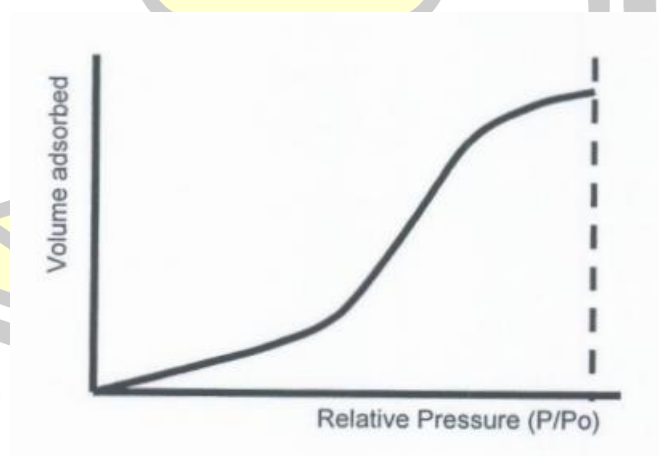
2.7.4 Type IV Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวถูกดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ และเกิดการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น คล้าย Type II แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจาก รูพรุนแคปิลารี ภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อ Relative pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพประกอบที่ 11 ไอโซเทอม Type IV Isotherm
ที่มา [30]

2.7.5 Type V Isotherm เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจาก รูพรุนแคปิลารี ภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว เป็นผลจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าน้อย ๆ แต่จะต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) โดยไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยมากนัก



ภาพประกอบที่ 12 ไอโซเทอม Type V Isotherm
ที่มา [30]

2.8 จลพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลพลศาสตร์การดูดซับด้วย [31]

2.8.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

จากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยา [31]



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (Adsorbent) และ A*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_e}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.13)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ค่าการดูดซับของการดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.13 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_e=0$ จนถึง $q_e=t$ จะได้สมการคือ

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

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.15)$$

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

2.8.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ [31]



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.17)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่⁻¹)
เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.17 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการคือ

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (2.18)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.19)$$

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

2.8.3. แบบจำลอง Elovich

สมการของ Elovich ได้รับการพัฒนาโดย Zeldowitsch [32] อย่างกว้างขวางเพื่อกำหนดการดูดซับก๊าซบนวัสดุที่เป็นของแข็ง [33] สมการเชิงประจักษ์กึ่งนี้ยังใช้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำหนดจลนพลศาสตร์ของลำดับที่สองสมมติว่าพื้นผิวที่เป็นของแข็งของของแข็งนั้นมีความหลากหลายแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสมการนี้ไม่แนะนำให้ใช้กลไกการดูดซับที่แน่นอน [34] แบบจำลองนี้กำหนดจลนศาสตร์ของกระบวนการทางเคมี

สมการ Elovich แทบจะไม่ได้รับการฝึกฝนเพื่อการดูดซับสถานะของเหลวสมการ Elovich เป็นสมการอัตราอื่นตามความสามารถในการดูดซับซึ่งเขียนดังนี้

$$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(1 + \alpha * \beta * t) \quad (2.20)$$

- เมื่อ q_t คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ดูดซับบนพื้นผิวดูดซับ ณ เวลา t (mg / g)
 t คือ เวลาติดต่อ (นาท)
 a_E คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แสดงถึงอัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg / g นาท)
 b_E คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แทนค่าคงที่การปลดปล่อย (g / mg)

2.8.4 Fractal-like pseudo first order model (FL-PFO)

แฟร็กทัล p เหมือนหลอกรุ่นแรก (FL-PFO) ยิ่งไปกว่านั้นตามที่กล่าวโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ Azizian เกี่ยวกับสมการอัตรา Langmuir [35] และการได้มาของแบบจำลองคำสั่งผสม 1,2 โดย Marczewski [36] แบบจำลองลำดับแรกหลอกสามารถมาจากแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir [35] หรือ MOE [36] ภายใต้การพิจารณาที่แตกต่างกัน

ดังนั้นรูปแบบที่เหมือนเศษส่วนของมันจึงสามารถได้มาจาก Fractal - เช่น Langmuir kinetic model หรือ Fractal - เช่น MOE

$$q_t = q_e * (1 - \exp(-k_1 * t^\alpha)) \quad (2.21)$$

เมื่อ	k_{PFO}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราหากลำดับแรก (1 / นาที)
	k'_{PFO}	คือ เศษส่วน - เช่นค่าสัมประสิทธิ์อัตราจลน์ของลำดับแรกหากล (1 / นาที)
	t	คือ เวลาติดต่อ (นาที)
	h	คือ อัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg / g min)

2.8.5 Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)

เศษส่วน - เหมือนหากลำดับที่สอง (FL-PSO) เศษส่วนอีกครั้งเช่นรูปแบบของรูปแบบคำสั่งหากลที่สองสามารถได้มาจากเศษส่วน - เช่นแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir หรือเศษส่วนเช่น MOE ดังต่อไปนี้ [37, 38]

$$q_t = \frac{k_2 * q_e^2 * t}{1 + k_2 * q_e * t^\alpha} \quad (2.22)$$

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

2.9 ทองแดง (copper)

ทองแดงถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดยมนุษย์เมื่อนานกว่า 10,000 ปีที่แล้ว เป็นจีประดับขนาดเล็กและสิ่งของอื่นๆ ที่ค้นพบในตะวันออกกลางมีอายุประมาณ 8,700 ปีก่อนคริสตกาล วัตถุเหล่านี้ถูกตอกเพื่อสร้างรูปร่างจากนักเก็ตของ “ทองแดงพื้นเมือง” ซึ่งเป็นทองแดงบริสุทธิ์ ที่พบร่วมกับแร่ที่

มีทองแดง สิ่งประดิษฐ์เก่าแก่ที่สุดที่ทราบว่าเป็นทองแดง เช่นกัน สิ่งเหล่านี้ถูกขุดพบในอนาโตเลีย(ปัจจุบันคือตุรกี) และมีอายุราว 7,000 ปีก่อนคริสตกาล อย่างไรก็ตามการค้นพบล่าสุดในประเทศไทยบ่งชี้ว่าเทคโนโลยีสำริดเป็นที่รู้จักในตะวันออกไกลตั้งแต่ 4,500 ปีก่อนคริสตกาล ยุคสำริดสิ้นสุดประมาณ 1,200 ปีก่อนคริสตกาล หลังจากนั้นเทคโนโลยีเหล็ก(ยุคเหล็ก) กลายเป็นเรื่องธรรมดา

ปัจจุบันทองแดงและโลหะผสมทองแดงยังคงเป็นหนึ่งในกลุ่มหลักของโลหะเชิงพาณิชย์โดยอยู่ในอันดับที่สามรองจากเหล็ก เหล็กกล้า และ อลูมิเนียม ในการผลิตและการบริโภคมีการใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากการนำไฟฟ้ไฟและความร้อนที่ดีเยี่ยม ทนทานต่อการกัดกร่อน กรณีของการผลิต และความแข็งแรงและความล้าที่ดี โดยทั่วไปแล้วจะไม่ใช้แม่เหล็ก สามารถบัดกรีและประสานได้อย่างง่ายดาย และทองแดงโลหะผสมทองแดงหลายชนิดสามารถเชื่อมได้ด้วยวิธีแก๊ส อาร์ค และความต้านทานต่างๆ สำหรับชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับชิ้นส่วนตกแต่งสามารถใช้โลหะผสมทองแดงสามารถขัดเงาและขัดให้ได้พื้นผิวและความแวววาวที่ต้องการเกือบทุกชนิด สามารถชุบ เคลือบด้วยสารอินทรีย์หรือสีเคมีเพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับผิวสำเร็จที่มีอยู่

ทองแดงบริสุทธิ์ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับสายเคเบิลและสายไฟ หน้าสัมผัสทางไฟฟ้า และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่หลากหลายซึ่งจำเป็นต้องผ่านกระแสไฟฟ้าทองแดงและทองเหลืองบางชนิด บรอนซ์ และคิวโปรนิกเกิลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับหม้อน้ำเคลื่อนที่ในรถยนต์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ระบบทำความร้อนในบ้าน แผงสำหรับดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ และการใช้งานอื่นๆ ที่ต้องการนำความร้อนอย่างรวดเร็วหรือตามส่วนโลหะเนื่องจากความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่โดดเด่น ทองแดง ทองเหลือง สัมฤทธิ์บางชนิด และโลหะผสมดัดมีอยู่ในสภาวะการทำงานเย็นต่างๆ และความแข็งแรงของอุณหภูมิห้องและความต้านทานต่อความล้าของโลหะผสมเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของงานเย็นเช่นเดียวกับเนื้อหาของโลหะผสมการใช้งานทั่วไปของโลหะผสมขึ้นรูปเย็น (เทมเปอร์งานเย็น) แก่ สปริง ตัวยึด ฮาร์ดแวร์ เฟืองขนาดเล็ก [39]

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบที่ 13 ภาพของทองแดงในรูปแบบสารละลาย
ที่มา [40, 41]

2.9.1 ประโยชน์ของทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเครื่องเรือนต่างๆ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ เป็นโลหะที่สื่อไฟฟ้า และถ่ายเทความร้อนได้ดี มีความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงสามารถรีดขึ้นได้ง่าย อุตสาหกรรมที่มีการใช้งานทองแดง ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ เครื่องเรือน อุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็นและอุตสาหกรรมการผลิตกระป๋องบรรจุภัณฑ์ [22]

2.9.2 พิษของทองแดง

ทองแดง เป็นโลหะหนักที่สามารถถูกดูดซึมได้ในลำไส้ส่วนบนซึ่งซึมผ่านบริเวณผนังลำไส้ และเคลื่อนที่ไปที่ตับ ก่อนรวมตัวกับน้ำดีที่ลำไส้แล้วขับออกไปพร้อมกับอุจจาระหรืออาจจะดูดเข้าสู่ร่างกายได้อีกประมาณ 30% ก่อนเข้าสะสมที่กระดูก เนื้อเยื่อตับ และสมองโดยสะสมมากที่สุดในระดับและสมอง หากร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากและเกินความต้องการของร่างกาย ทองแดงจะก่อความเป็นพิษขึ้น ได้แก่ ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสียเกิดการอักเสบของเนื้อเยื่อ

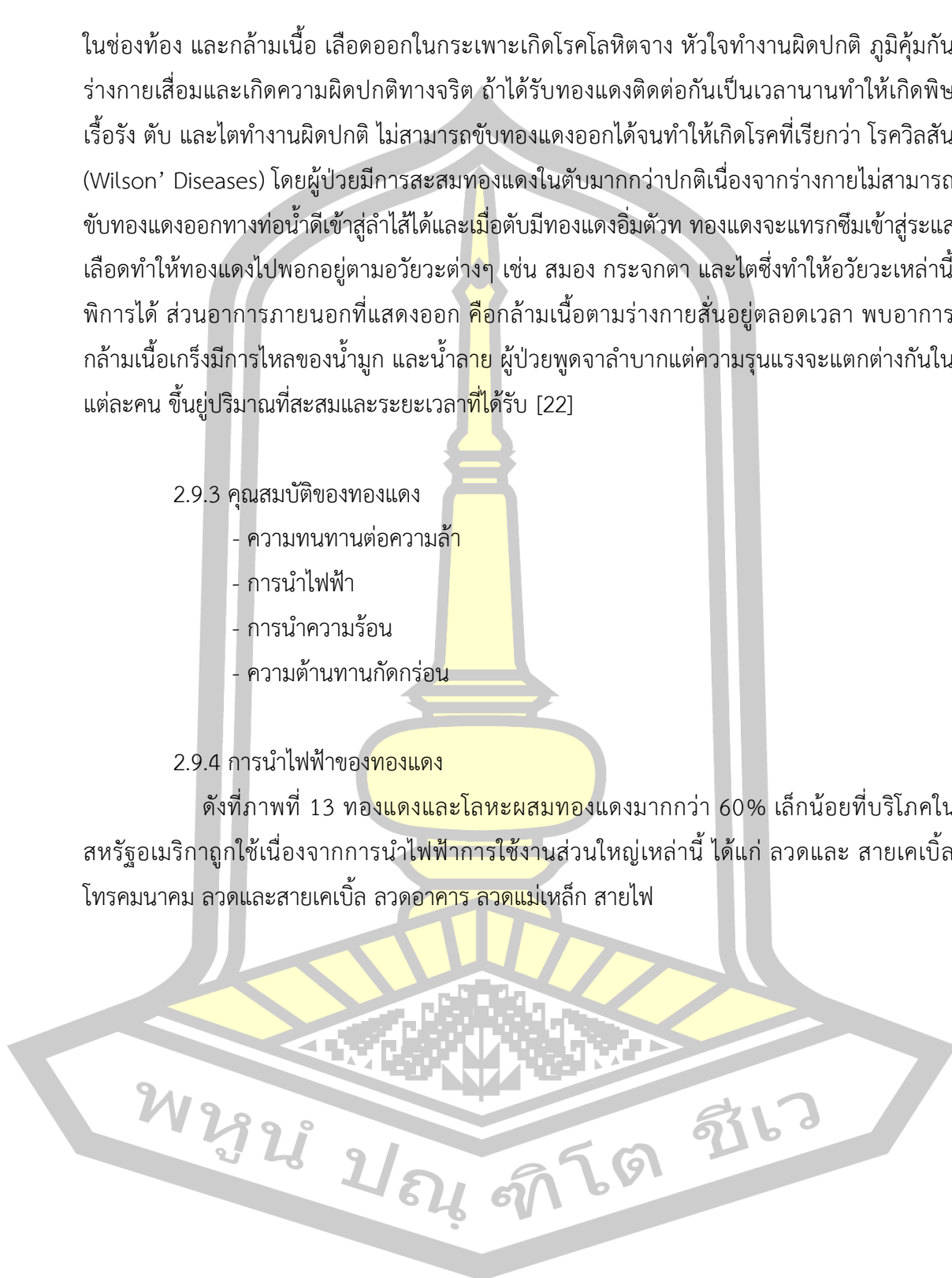
ในช่องท้อง และกล้ามเนื้อ เลือดออกในกระเพาะเกิดโรคโลหิตจาง หัวใจทำงานผิดปกติ ภูมิคุ้มกัน ร่างกายเสื่อมและเกิดความผิดปกติทางจิต ถ้าได้รับทองแดงติดต่อกันเป็นเวลานานทำให้เกิดพิษเรื้อรัง ตับ และไตทำงานผิดปกติ ไม่สามารถขับทองแดงออกได้จนทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า โรควิลสัน (Wilson' Diseases) โดยผู้ป่วยมีการสะสมทองแดงในตับมากกว่าปกติเนื่องจากร่างกายไม่สามารถขับทองแดงออกทางท่อน้ำดีเข้าสู่ลำไส้ได้และเมื่อตับมีทองแดงอึดตัวท ทองแดงจะแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือดทำให้ทองแดงไปพอกอยู่ตามอวัยวะต่างๆ เช่น สมอง กระดูกตา และไตซึ่งทำให้อวัยวะเหล่านี้พิการได้ ส่วนอาการภายนอกที่แสดงออก คือกล้ามเนื้อตามร่างกายสั่นอยู่ตลอดเวลา พบอาการกล้ามเนื้อเกร็งมีการไหลของน้ำมูก และน้ำลาย ผู้ป่วยพูดจาลำบากแต่ความรุนแรงจะแตกต่างกันในแต่ละคน ขึ้นอยู่กับปริมาณที่สะสมและระยะเวลาที่ได้รับ [22]

2.9.3 คุณสมบัติของทองแดง

- ความทนทานต่อความล้า
- การนำไฟฟ้า
- การนำความร้อน
- ความต้านทานกัดกร่อน

2.9.4 การนำไฟฟ้าของทองแดง

ดังที่ภาพที่ 13 ทองแดงและโลหะผสมทองแดงมากกว่า 60% เล็กน้อยที่บริโภคในสหรัฐอเมริกาถูกใช้เนื่องจากการนำไฟฟ้าการใช้งานส่วนใหญ่เหล่านี้ ได้แก่ ลวดและ สายเคเบิล โทรคมนาคม ลวดและสายเคเบิล ลวดอาคาร ลวดแม่เหล็ก สายไฟ



ตารางที่ 2 Copper and copper alloy consumption in the United States by functional use in 1997 ที่มา [24]

End use	Millions of pounds	%
Electrical conductivity	5023	61
Corrosion resistance	1701	20
Heat transfer	949	11
Structural capability	515	6
Aesthetics	131	2
Total	8319	100

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานปัจจุบันความสามารถของวัสดุผสมไม้-พลาสติกที่มีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้เป็นวัสดุรีไซเคิลเพื่อกำจัดเม็ดสีเมทิลินบลูไอออนบวก ผลกระทบที่สำคัญบางอย่างตรวจสอบพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่า pH ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาสัมผัส ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลินบลูเงินถูกทำให้สูงสุดที่ค่า pH ที่เป็นด่าง ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับและการสัมผัสที่เพิ่มขึ้น เวลา ค่าของ R2 ในแบบจำลองแลงเมียร์เท่ากับ 1 และปัจจัยการแยกสารดูดซับ 0.5 และ 1 กรัมเท่ากับ 0.09 และ 0.1 ตามลำดับ เนื่องจากข้อมูลการดูดซับเมทิลินบลูมีความสอดคล้องกับแลงเมียร์มากกว่าแบบจำลองไอโซเทอรัสมการระบุได้ว่าไม้ผสมพลาสติกอาจมีพื้นผิวการดูดซับที่สม่ำเสมอและกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นในระบบที่เป็นเนื้อเดียวกันบนพื้นผิวดูดซับ จากผลการศึกษาพบว่าคอมโพสิตนี้เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเม็ดสีบลูออกจากสารละลายที่เป็นน้ำและใช้เป็นสารทำให้บริสุทธิ์ในการลดสีของน้ำทิ้งที่มีเม็ดสีตัวดูดซับนี้สามารถรีไซเคิลได้และประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ[42]

สังเคราะห์ออกไซด์สองชั้นของโลหะคาร์บอนและโลหะต้นทุนต่ำ (C/MnCuAl-LDOs) ตัวดูดซับนาโน โดยการตกตะกอนร่วม สำหรับการดูดซับสีแดงคองโก (CR) โดยใช้คาร์บอนดัดแปรที่ได้มาจากไพโรไลซิสของ ขยะพลาสติกโพลีสไตรีน (PS) C/MnCuAl-LDOs ที่สังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างผลึกที่สูงเนื้อที่ 60.43 ตารางเมตร/กรัม และขนาดรูพรุน 99.85 Å การดูดซับ CR โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมไว้ทั้งหมดจากสารละลายที่เป็นน้ำภายใต้ภาวะสมดุลและสภาวะจลนศาสตร์ได้รับการประเมินเทียบกับค่าต่างๆ ของ pH (4–10), ความเข้มข้นของ CR เริ่มต้น (25–250 มิลลิกรัม/กรัม), เวลาสัมผัส (0–310 นาที) และอุณหภูมิ (30–50 องศาเซลเซียส) ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า C/MnCuAl-LDO

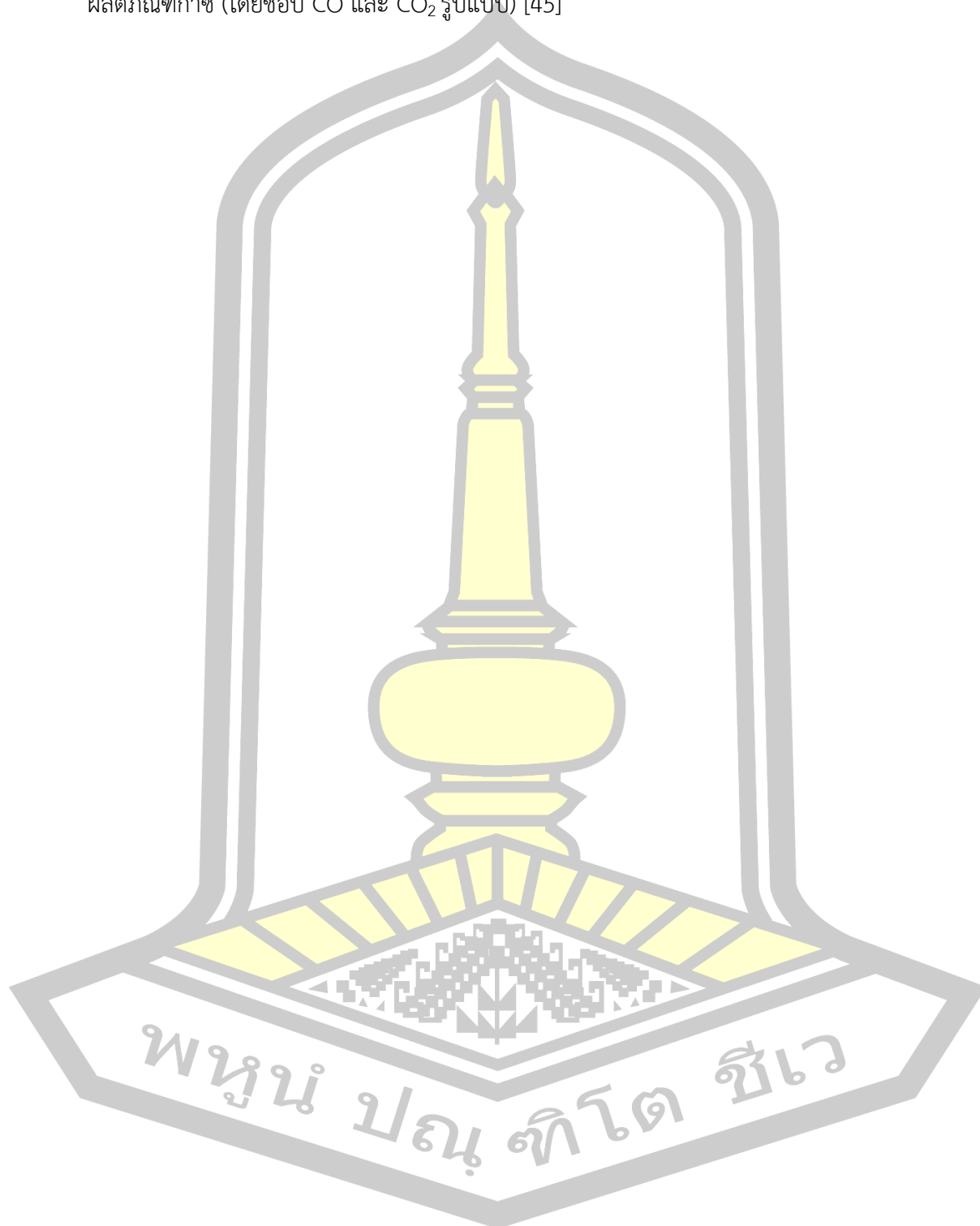
แสดงความสามารถในการดูดซับสูงสุดสำหรับ CR ในบรรดาตัวดูดซับที่ใช้แล้วทั้งหมด เวลาสมมูลที่เหมาะสมคือ 180 นาที ในขณะที่ตัวกลางที่เป็นกรด (pH 4.5) ให้การดูดซับสูงสุดของ CR สูงถึง 317.2 มิลลิกรัม/กรัม บน C/MnCuAl-LDOs จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอันดับสองหลอก ในขณะที่ติดตั้งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ข้อมูลที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่า C/MnCuAl-LDOs เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย [43]

ปัญหาสิ่งแวดล้อมสองประการพบกันในงานนี้ วิธีแก้ปัญหาคือหนึ่งคือการหาวิธีนำขยะมาใช้ประโยชน์ พลาสติก polyethylene (PE) และ polypropylene (PP) ซึ่งเพิ่มขึ้นทุกวันทั่วโลก ปัญหาที่สองคือการรั่วไหลของน้ำมันในบริเวณแหล่งน้ำ เราใช้ผงและแผ่นเหลือทิ้ง polyethylene (PE) และ polypropylene (PP) ดูดซับน้ำมันจากน้ำด้วยการสัมผัสเพียงไม่กี่นาที ผลของผงแป้งและแผ่นที่มีปริมาณต่ำของการฉายรังสี γ (3 Mrad) ในการเปิดใช้งานโพลิเมอร์ปัจจุบันถูกตรวจสอบการตรวจดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตริก (DSC) และการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของโพลิเมอร์ที่เรียบร้อยและซับน้ำมันได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมของโพลิเมอร์เหล่านี้ [44]

งานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของขยะชีวมวลและพลาสติก และนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายที่เป็นน้ำ ชุดทดลองของ Fe, Ni, Cu, Cr, Cd และ Pb ด้วยถ่านชีวภาพและถ่านพลาสติกถูกนำไปหาผลกระทบของพารามิเตอร์การทดลองต่างๆ (วัตถุดิบ เวลาสัมผัส ปริมาณสารดูดซับ ค่า pH และอุณหภูมิไพโรไลซิส) แบบจำลองการดูดซับด้วยอุณหภูมิความร้อนแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพนั้นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านพลาสติก สูงสุดประสิทธิภาพการกำจัดถ่านไบโอชาร์และพลาสติกที่ pH 4 เท่ากับ 99.86% และ 99.93% ตามลำดับ ทั้งดั่งนั้นวัสดุคาร์บอนจึงได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุควบคุมมลพิษที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ศึกษา [3]

ผลปรากฏว่าการเพิ่มส่วนผสมพลาสติกช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของไพโรไลซิสแบบช้าของต้นสน ดังนั้นเป็นไปได้ที่จะได้ผลผลิตของเหลวที่สูงขึ้นและของแข็งน้อยลง ผลิตภัณฑ์มากกว่าในคาร์บอนเซชันแบบไพโรไลซิสช้าแบบคลาสสิกของชีวมวล ของเหลวที่ได้มีค่าความร้อนคล้ายกับน้ำมันเตาที่ให้ความร้อน ผลิตภัณฑ์ก๊าซมีเนื้อหาพลังงานที่เหนือกว่าของผู้ผลิตก๊าซและได้เศษส่วนที่เป็นของแข็งมีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านหินบางส่วน นอกจากนี้ยังมีการระบุผลิตภัณฑ์ทั่วไปของไพโรไลซิสชีวภาพแบบเร็วที่ใช้เป็นวัตถุดิบในหลายอุตสาหกรรม ผลของเงื่อนไขการทดลองในด้านผลผลิตและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เดอะพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงกว่า ได้แก่ เวลาปฏิกิริยากับองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของก๊าซและองค์ประกอบของของเหลว เปิดอุณหภูมิปฏิกิริยาผลผลิตของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ก๊าซ ความดันเริ่มต้นต่อองค์ประกอบของของเหลวและส่วน

ใหญ่เป็นไม้สนปริมาณของส่วนผสมเริ่มต้นต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์และอื่นๆ ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ก๊าซ (โดยชอบ CO และ CO₂ รูปแบบ) [45]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่ทำการวิจัย

การทดลองวิจัย ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรจำเพาะของรูพรุน ดำเนินการที่ ดิ็กศูนย์ เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การถ่ายภาพของถ่านไบโอชาร์ที่ทำจากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก ที่เตรียมถ่ายด้วยกล้อง อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ดำเนินการที่ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุรนารี

3.2 การเตรียมถ่านชาร์

3.2.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 เตาเผาไร้อากาศไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process) ดังแสดงในภาพที่ 14

พูน ปณ จิโต ชีเว



ภาพประกอบที่ 14 เตาเผาไร้อากาศแบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process)

3.2.2 สารเคมีและวัสดุดิบ

3.2.2.1 ไม้เหลือจากการใช้งาน

3.2.2.2 เศษพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการรีไซเคิล

3.2.2.3 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.2.4 เครื่องวัดความเป็นกรดเบส (pH Meter)

3.2.2.5 ควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

3.2.2.6 เครื่องสเปกโตรโฟมิเตอร์

3.2.2.7 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.2.2.8 กระจกกรอง GF/C

3.2.2.9 ชุดกรอง ประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม และขวดกรอง

3.2.2.10 ขวดชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2.2.11 จุกปิดแก้ว (Glass stopper)

3.2.2.12 ปากคีบ (Forceps pointed end).



ภาพประกอบที่ 15 เศษไม้เหลือใช้ (Wood) (ก่อนนำไปเผา)



ภาพประกอบที่ 16 เศษพลาสติก (Plastic Waste) (ก่อนนำไปเผา)

3.2.3 วิธีการทดลอง

3.2.3.1 การเตรียมไม้ (Wood) และเศษพลาสติก (Plastic Waste)

- เก็บไม้ (Wood) ที่เหลือใช้จากไซต์งานก่อสร้าง
- นำมาดัดสิ่งเจอบนในไม้ (Wood) ออกให้หมด เช่นจำพวก ตะปู
- นำเศษพลาสติก (Plastic Waste) มาจากโรงงานหลอมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล
- นำไม้ (Wood) และเศษพลาสติก (Plastic Waste) เหลือใช้มาชั่งน้ำหนัก ให้ได้ อัตราส่วน 4 ไม้ (Wood) ต่อ 1 เศษขยะพลาสติก (Plastic Waste)

- นำไม้ (Wood) และเศษพลาสติก (Plastic Waste) ที่ซังน้ำหนัก
- นำมาเผาในเตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning สูง (High) 2.50 เมตร โดยเตาเผาปริมาตร 0.62 ตารางเมตร
- เผาโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเผาที่ 1 ชั่วโมงทุกๆ Temp โดยเริ่ม จั บ เวลานั้นตั้งแต่เริ่มจุดไฟเตาเผา เมื่อเผาครบ 1 ชั่วโมงแล้ว ห้ามเปิดเตาเผาโดยเด็ดขาด
- ต้องรอให้อุณหภูมิภายในเตาต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้ถ่านที่ยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จะทำปฏิกิริยากับอากาศอาจจะทำให้ติดไฟได้
- เมื่อได้ถ่านแล้วนำมาซึ่งว่าเผาไหม้ไปแล้วยังคงเหลือน้ำหนักเท่าไร

3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์

3.3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ: ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็น แบบผงใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็งควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วแต่ภาชนะที่รองรับด้วยมีขนาดเล็กจะดีกว่าเนื่องจากตัวอย่างจะสามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนลงกราวด์ ได้ดีกว่าป้องกันการ (Charging effects) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่าง ด้วยทองหรือคาร์บอน

3.3.1.2 X-Ray Diffractometer (XRD)

สารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูป ของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช) ปริมาณผงตัวอย่างที่เหมาะสมประมาณ 1-2 กรัม (หากตัวอย่างมีน้อย สามารถอัดบนแผ่นวางตัวอย่างแบบ zero background ได้) และอัดด้วยแรง กระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีต้องมีการ จัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (random orientation) หากตัวอย่างเป็นก้อน ต้องตัดและขัดหน้า ตัวอย่างให้

เรียบ ขนาดก้อนตัวอย่างประมาณ 10×10 เซนติเมตร การเตรียมตัวอย่าง ที่ดีมีผลมาก ต่อ ผลการวิเคราะห์ เช่น

หากบดตัวอย่างละเอียดเกินไปจะทำให้ลายโครงสร้างผลึกหรือหากใช้แรงอัดตัวอย่าง มากเกินไปจะทำให้เกิด Preferred Orientation ขึ้นได้

3.3.1.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียมดังนี้

3.3.1.3.1 บดตัวอย่างให้มีความละเอียด

3.3.1.3.2 ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ในโถรงบดสารโดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้น ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่าง สม่ำเสมอ

3.3.1.3.3 ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกให้มีความดัน ประมาณ 15,000 ทั้งไว้ 1-2 นาที

3.3.1.3.4 ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออกตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์มีลักษณะเป็น วงกลมใสและ ตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR ได้เลย²⁷

3.3.1.3.5 การทำความสะอาดแม่พิมพ์ใช้ช้อนตักสารสแตนเลสชุดตัวอย่างออกมา เช็ดด้วยกระดาษ ทิชชูและล้างด้วยอะซิโตนแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

3.3.4 Surface area and porosity analyzer (BET)

เป็นการวิเคราะห์พื้นผิวและการกระจายของรูพรุนปริมาตรของรูพรุนในแบบต่างๆ ด้วยวิธีให้ ตัวอย่างมีการดูดซับหรือคายก๊าซเพื่อวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรูพรุนพื้นที่ผิวของผง ตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของ Volumetric gas adsorption method เช่น N_2 , Ar_2 , CO_2 , H_2 และ ก๊าซไม่กัดกร่อนอื่นๆ BET เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการ วิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการ วิเคราะห์ประมาณ 0.3-0.5 กรัมสถานะของแข็ง เช่น อนุภาคผง เม็ด แผ่นฟิล์ม เป็นต้น ต้องไม่ฟุ้ง

กระจายมากและไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันหากเป็นตัวอย่างอัดเม็ดจะต้องมี เส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และต้องทำการ อบตัวอย่างมาก่อน

3.4 ความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเตรียมในสารละลายกรดที่มีค่า pH ไม่เกิน 2 ของถ่านชาร์จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก หาได้จากการเปรียบเทียบปริมาณทองแดงก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านชาร์จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะทองแดง คำนวณจากสมการ

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

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)

3.5 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัว ถูก 27 ละลายบนผิวแข็งจะเป็นตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของ สารละลายที่ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุดโดยมี สมมติฐาน คือ

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

4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุล ข้างเคียงได้ สมการแลเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณี ที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นชั้นเดียวเท่านั้น

3.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการนำผลจากการทดลอง ระยะเวลาการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ มาทำการทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ ดังนี้

- ทำการชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกโคและสุกร 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL เติมน้ำละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรทเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อบลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

- ทำการกวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10, 30, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 720 และ 960 นาที

นำผลที่ได้จากการทดลองไปหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่คำนวณความสามารถในการดูดซับต่อเวลา และศึกษากลไกการดูดซับด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) สมการปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) Elovich Isotherm Fractal-like pseudo first order model (FLPFO) Fractal-like pseudo second order (FLPSO) และ General order

วิเคราะห์การถดถอยทางสถิติแบบ Nonlinear Regression เพื่อหาค่าคงที่ในการแบบจำลองอัตราการดูดซับโดย การวิเคราะห์ข้อผิดพลาด (Error analysis) ผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Residual Sum of Squares Error, SSE) สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ลดลง (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 เทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจาก ข้อ 3.3 มาใช้ในการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ΔG° [46] ได้จากสมการที่ (3.2)

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

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล องศาเซลวิน และ T คือ อุณหภูมิ สมบูรณ์ (องศาเซลวิน) ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS°) คำนวณได้จากค่าความชัน และจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ [46] 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)

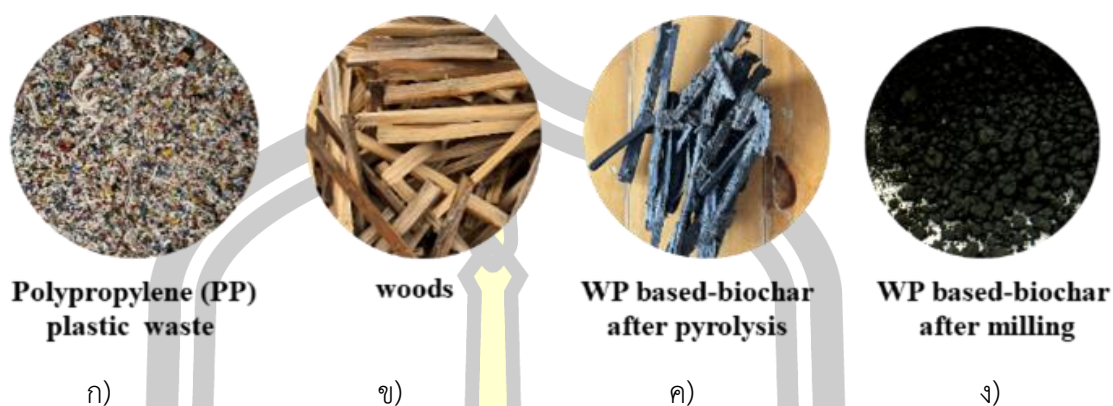
พูน ปณ จิโต ชีเว

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

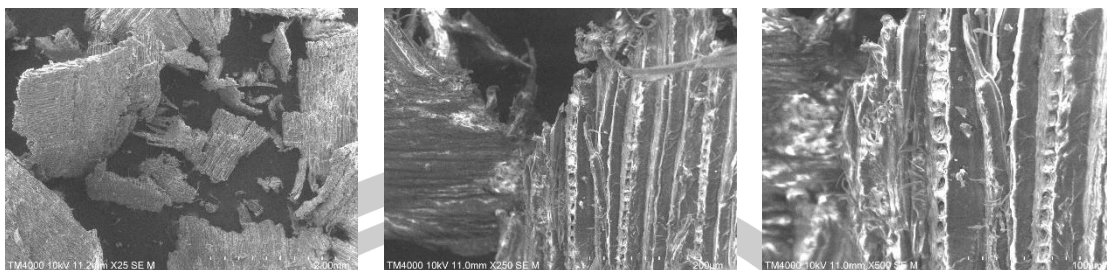
กระบวนการเตรียมถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) นั้นสามารถทำได้โดย นำเศษไม้ที่ได้จา การรื้อถอนแบบก่อสร้างและเหลือใช้จากการทำเฟอร์นิเจอร์ของโรงงานเฟอร์นิเจอร์ จาก จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย มาทำความสะอาดนำสิ่งเจือปนต่างๆออก เช่น ตะปู สกรู ตัดไม้ให้มีขนาดความยาว 10 ถึง 15 เซนติเมตร แล้วนำไปตากให้แห้ง นำขยะพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการขึ้นรูปเม็ดพลาสติก โดยขยะพลาสติกเป็นพลาสติกประเภท โพลีโพรไพลีน (PP) นำมาตากให้แห้งสนิทจากนั้นนำเศษไม้ที่ตากแห้งสนิทแล้วมาปริมาณ 1000 กรัม และ นำขยะพลาสติก (PP) มาเตรียมปริมาณ 250 กรัม เตรียมเป็นสามชุด สำหรับ 3 อุณหภูมิ นำเศษไม้ผสมกับขยะพลาสติก (PP) มาผสมเข้าด้วยกันจากนั้นนำเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่หนึ่งเผาด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่สองเผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และ ตัวอย่างที่สามเผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลา 1 ชั่วโมง จะต้องรอให้อุณหภูมิในเตาลดลงต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส จึงสามารถเปิดได้ ไม่อย่างนั้น ถ่านที่กำลังร้อนในเตาจะทำปฏิกิริยากับอากาศทำให้ไฟลุกได้ นำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) มาชั่งน้ำหนักที่เหลือโดยอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส มีน้ำหนัก 400 กรัม อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีน้ำหนัก 350 กรัม และ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีน้ำหนัก 300 กรัม นำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) มาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับสภาพให้เป็นกลางและนำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) มาบดให้เป็นผงเพื่อสำหรับการวิเคราะห์ SEM-EDX, BET, XRD, FTIR และหาความสามารถในการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนทองแดงในรูปแบบสารละลายกรด



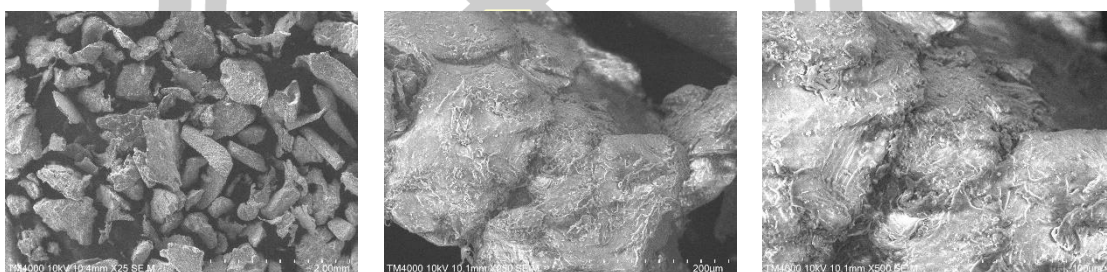
ภาพประกอบที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ ก) ขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน ข) เศษไม้ ค) ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก ง) ถ่านไบโอชาร์ที่ถูกบดแล้ว

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวและลักษณะโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมกับขยะพลาสติก การใช้กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) มีผลต่อความเป็นรูพรุนและลักษณะโครงสร้าง [47] จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อทำการเปรียบเทียบสภาพลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมด้วยเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าภาพประกอบที่ 18 และ 19 แสดงตัวอย่างเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) ที่ไม่สามารถขึ้นรูปก่อนเผา โดยใช้กำลังขยายที่ 25, 250 และ 500 เท่า พบว่าโครงสร้างของเศษไม้ก่อนเผานั้นมีความเรียงตัวกันของเซลล์และเส้นใยของไม้คล้ายเส้นตรงอย่างชัดเจนและยังมีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนโครงสร้างของขยะพลาสติก (PP) จากภาพประกอบที่ 19 พบว่าโครงสร้างลักษณะเป็นขุยมีลักษณะเฉพาะเนื่องจากกระบวนการผลิต [48] แสดงถึงความเหนียวของพลาสติก ลักษณะเส้นใยเรียงตัวสลับกันไปมามีขนาดเล็กใหญ่แตกต่างกันออกไปเพราะถูกผ่านกระบวนการบดสับมา

ศูนย์ ปณฺ ทัต ชีว



ภาพประกอบที่ 18 ลักษณะทางกายภาพของเศษไม้ กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x



ภาพประกอบที่ 19 ลักษณะทางกายภาพของขยะพลาสติก (PP) ที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้แล้ว
กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x

เมื่อนำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมกับขยะพลาสติก (PP) โดยอุณหภูมิในการเผาอยู่ที่ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส มาส่องโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) แล้วพบว่าพื้นผิวและโครงสร้างของ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมกับขยะพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก พบว่ามีลักษณะพื้นผิวมีช่องว่างกึ่งกลม กึ่งรี ขนาดช่องว่างนั้นไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและใหญ่ต่างกันออกไป แต่มีความพรุนอยู่ทุกอุณหภูมิที่ทำการเผา หากยิ่งเพิ่มอุณหภูมิถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) ขนาดของรูพรุนและรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น นั้นแสดงว่าปรับสภาพผิวและโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมกับขยะพลาสติกนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหากเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า จะได้เห็นการกระจายตัวของรูพรุนในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ดังที่แสดงในภาพประกอบที่ 20, 21 และ 22 โดยคุณสมบัติความพรุนของถ่านไบโอชาร์ทำ

ให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพราะช่องว่างในพื้นที่ดินจะเป็นที่กักเก็บน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและธาตุอาหารต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปกำจัดน้ำเสียที่มีสารเคมีปนเปื้อน สารเคมีและ ปนเปื้อนโลหะหนักได้ [49] [50]

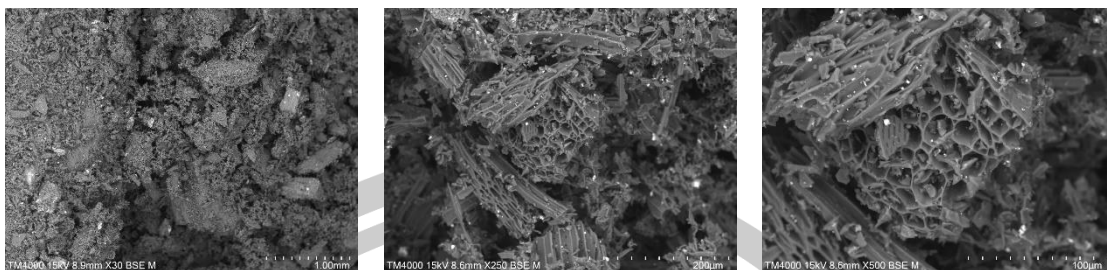


ภาพประกอบที่ 20 ลักษณะทางกายภาพของ WP Biochar 300 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x



ภาพประกอบที่ 21 ลักษณะทางกายภาพของ WP Biochar 400 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x

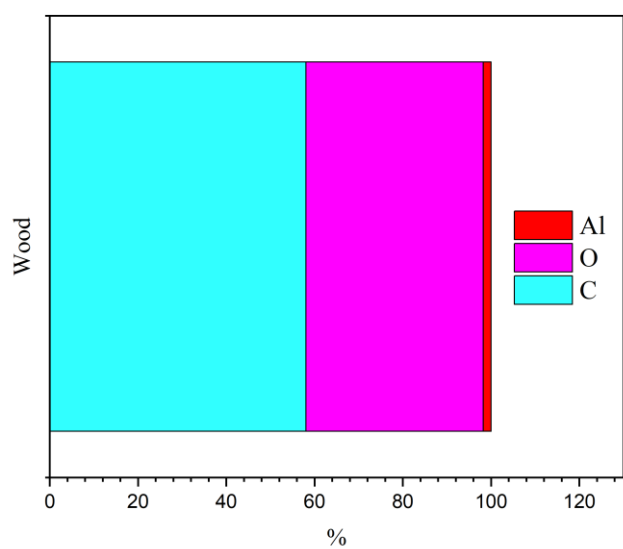
พหุ ประ โท ชี เว



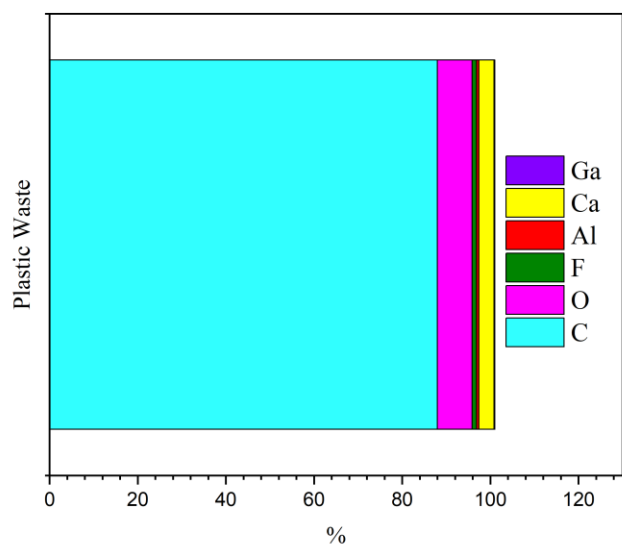
ภาพประกอบที่ 22 ลักษณะทางกายภาพของ WP Biochar 500 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25x, 250x, และ 500x

นอกจากวิเคราะห์สภาพพื้นผิวและโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) นั้นยังได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) ที่สามารถระบุธาตุและองค์ประกอบที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) ได้โดยได้เริ่มวิเคราะห์จากเศษไม้ก่อนนำเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) พบว่า ในเศษไม้พบธาตุ C=58.04%, O=40.21%, และ Al=1.76% จากนั้นวิเคราะห์ขยะพลาสติก (PP) ก่อนเผาพบธาตุ C=88.02%, O=7.87%, F=0%, Al=0.54, Ca=3.44%, และ Ga=0.14% ดังภาพประกอบที่ 4.6, และ 4.7 เมื่อถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) ด้วยอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส พบธาตุ C=72.48%, O=19.51%, Al=5.31%, Ca=2.70% การเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบธาตุ C=84.98%, O=10.42%, Ca=2.14%, และ Cl=1.14% และการเผาที่อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส พบธาตุ C=92.03%, O=3.32%, Al=3.43%, และ Cl=1.22% ดังภาพประกอบที่ 23

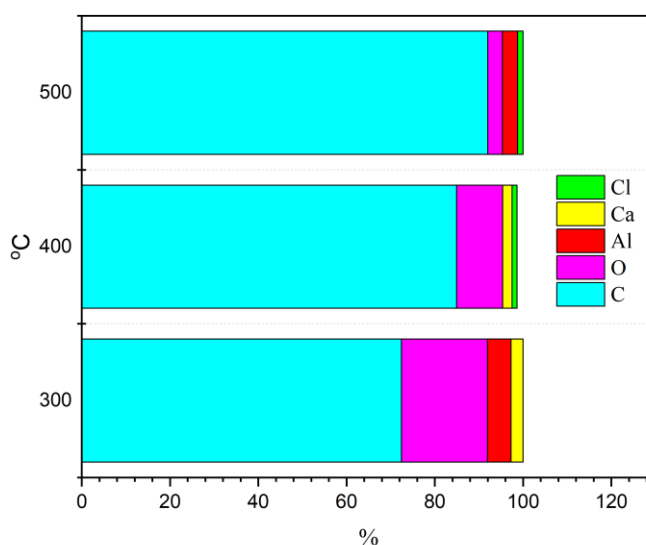




ภาพประกอบที่ 23 ส่วนประกอบของธาตุที่อยู่ในเศษไม้



ภาพประกอบที่ 24 ส่วนประกอบของธาตุที่อยู่ในขยะพลาสติก (PP)

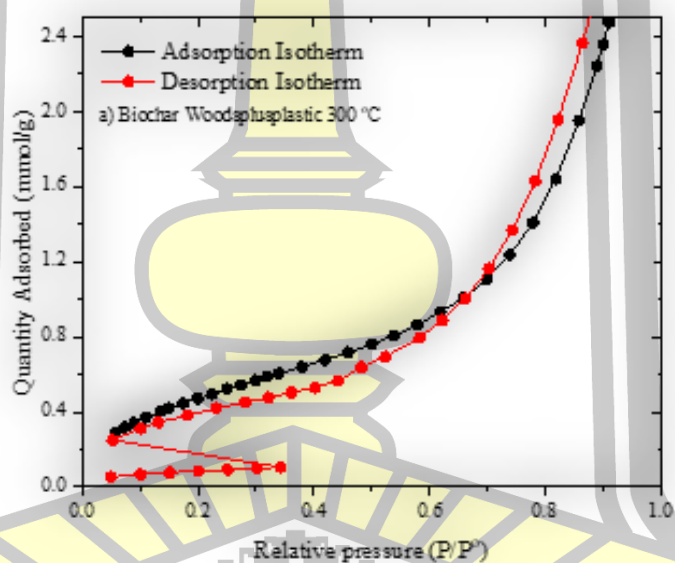


ภาพประกอบที่ 25 ส่วนประกอบของธาตุที่อยู่ในถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)

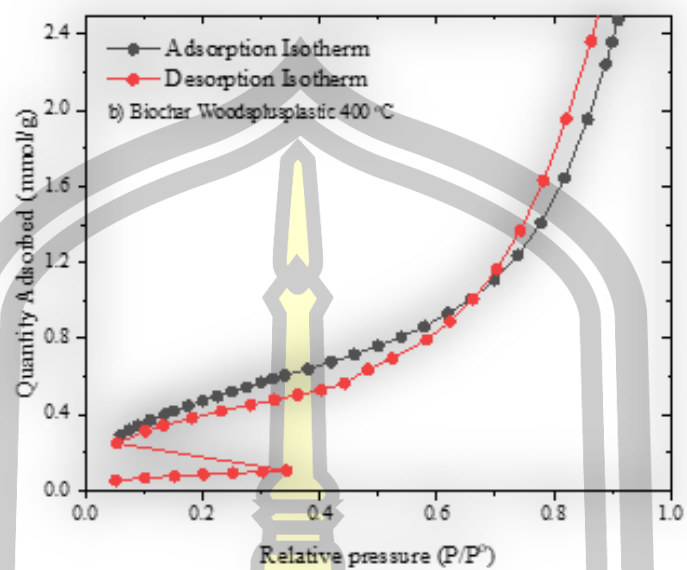
สรุปได้ว่าโครงสร้างเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) ก่อนเผานั้นไม่พบพื้นผิวที่มีช่องว่างกึ่งกลม กึ่งรี โดยเศษไม้นั้นมีการเรียงตัวของใยไม้เป็นเส้นตรงและยังมีธาตุต่างๆยึดเกาะบนพื้นผิว แต่เมื่อนำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) นั้นพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นผิว มีการเปลี่ยนแปลงของธาตุบนพื้นผิวที่เปลี่ยนไปและ ลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนไป หากเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้บางธาตุนั้นแปรเปลี่ยนเกิดเป็นธาตุใหม่ขึ้นมาและ มีการกระจายตัวของรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นและขนาดของรูพรุนก็จะขยายตามขึ้นไปด้วย หากมีการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มว่าโครงสร้างของถ่านจะเปราะ แตกหักง่าย พลาสติกที่ผสมก็ละลายติดไปกับพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ นั้นแสดงให้เห็นได้ชัดว่าอุณหภูมินั้นแปรผันตรงกับพื้นผิวและโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ซึ่งสามารถดูจากโครงสร้างที่การเปลี่ยนแปลงในหัวข้อหมู่ฟังก์ชันของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้

4.2 พื้นที่ผิวและความพรุน Brunauer-Emmett-Teller (BET)

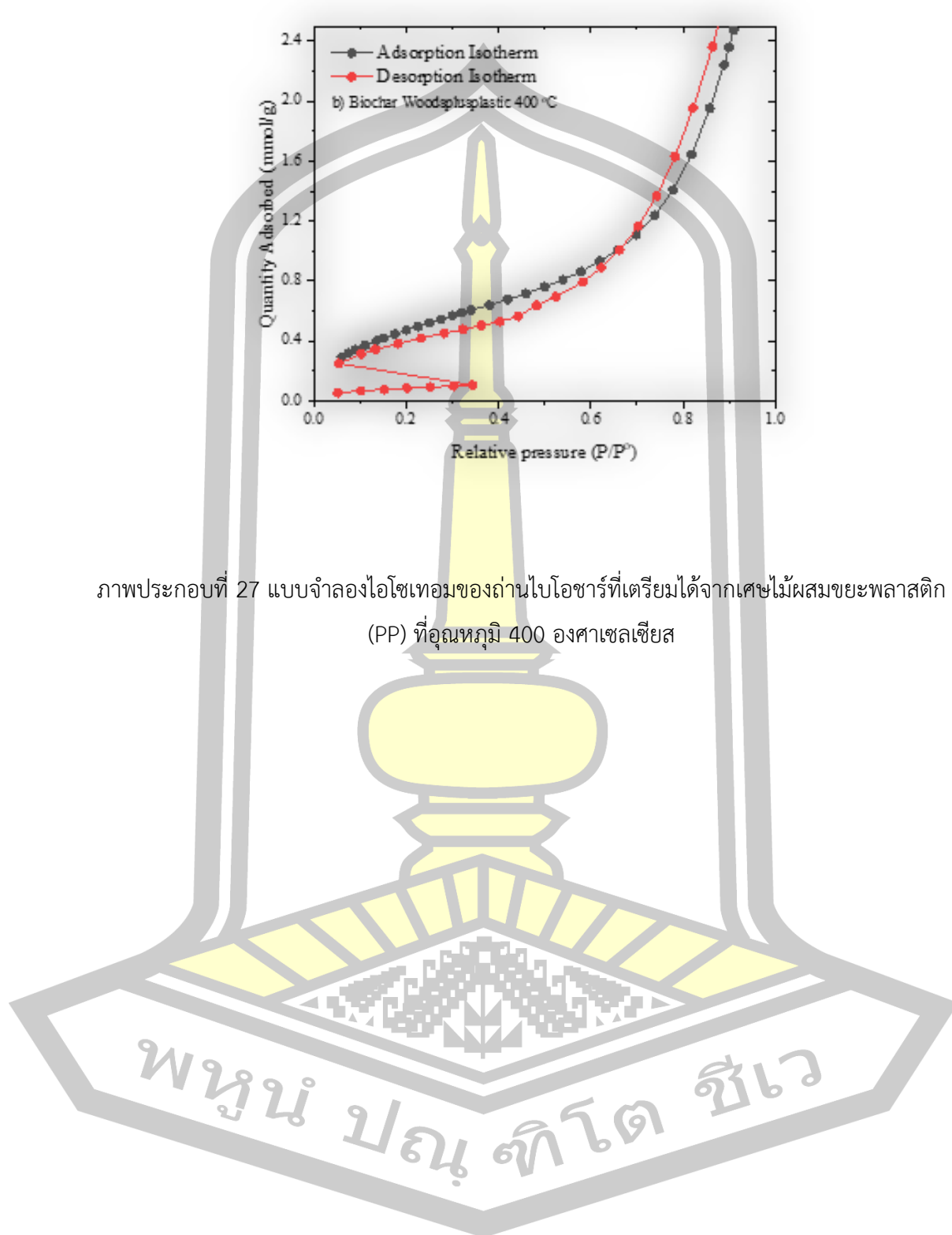
โดยทั่วไปไอโซเทอมจะใช้ในการศึกษาการดูดซับเพื่อระบุลักษณะพฤติกรรมของการดูดซับของวัสดุ และให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นผิวและความสามารถในการดูดซับ แบบจำลองไอโซเทอมไอโซเทอมต่างๆ ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายกระบวนการดูดซับและ แต่ละแบบจำลองจะตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมของการดูดซับ ไอโซเทอม Brunauer-Emmett-Teller (BET) ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียสจากการนำเข้าการทดลองพบว่าตรงกับโมเดลไอโซเทอมประเภทที่ 3 (Type III) [31] เป็นการดูดซับทางกายภาพบนพื้นผิว [51]

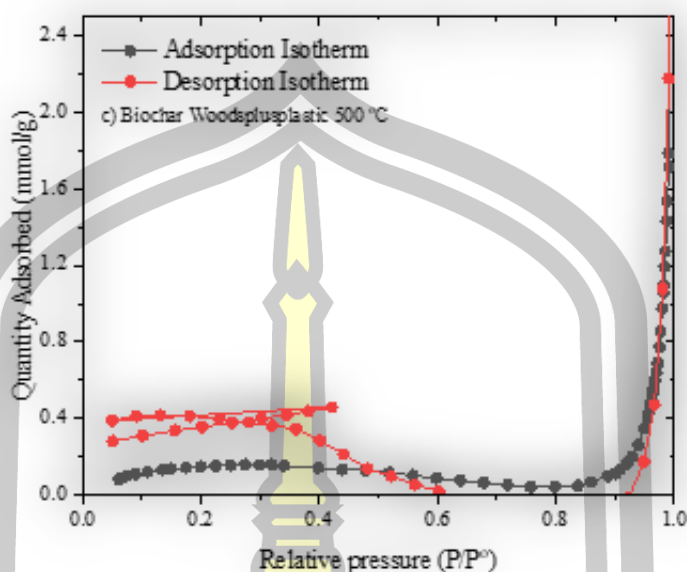


ภาพประกอบที่ 26 แบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 27 แบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส





ภาพประกอบที่ 28 แบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 3 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุนและ ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิว จำเพาะสูงสุดคือ 42.4650 m^2/g ตามด้วยอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส คือ 16.4242 m^2/g และ สุดท้ายคืออุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส คือ 11.9697 m^2/g ตามลำดับที่กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โครงสร้างจะเปลี่ยนตามอุณหภูมิและเวลาในการเผา ในขณะที่ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและเส้นผ่าน ศูนย์กลางรูพรุนโดยเฉลี่ยจะเป็นไปตามผลลัพธ์ของพื้นที่ผิวจำเพาะ แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการใช้เทคนิค การเผา เพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน

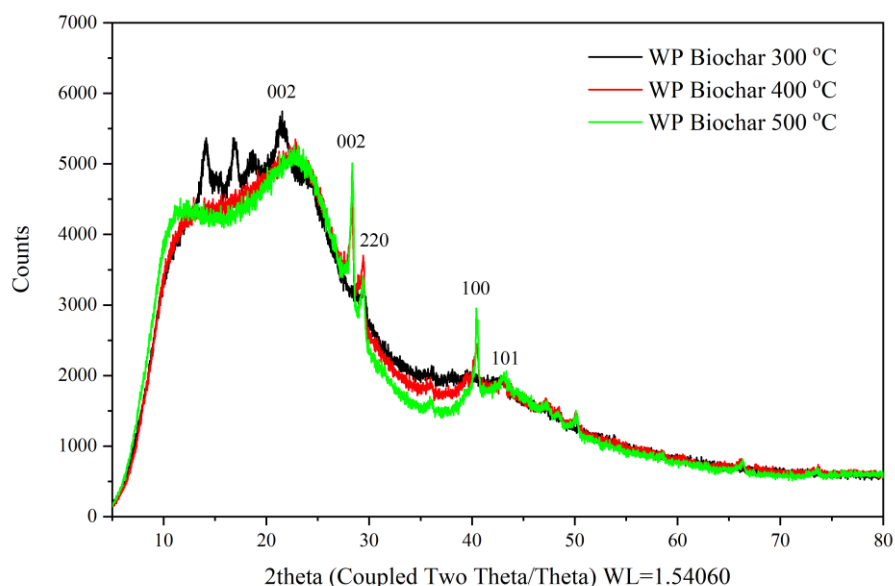
ตารางที่ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)

อุณหภูมิ	300 องศาเซลเซียส	400 องศาเซลเซียส	500 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	16.4242	42.4650	11.9697
ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ กรัม)	0.045739	0.112128	0.013309
เส้นผ่านศูนย์กลางรู พรุน (นาโนเมตร)	21.53	11.53	24.64

4.3 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction (XRD)

X-ray diffraction (XRD) เป็นเทคนิคทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุ โดยการส่องผ่านรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ไปยังตัวอย่างวัสดุและวัดการเบี่ยงที่เกิดขึ้นของรังสีที่สะท้อนกลับมา การเบี่ยงนี้เกิดจากการโคจรของรังสีเอ็กซ์ที่ชนะโครงสร้างภูมิสัมพันธ์ของอะตอมในตัวอย่างวัสดุ จากการวิเคราะห์การเบี่ยงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray) นี้สามารถหาค่าขนาดและรูปร่างของอะตอมหรือโครงสร้างภูมิสัมพันธ์ในระดับอะตอมของวัสดุได้โดย XRD เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาโครงสร้างในวัสดุต่างๆ [52]

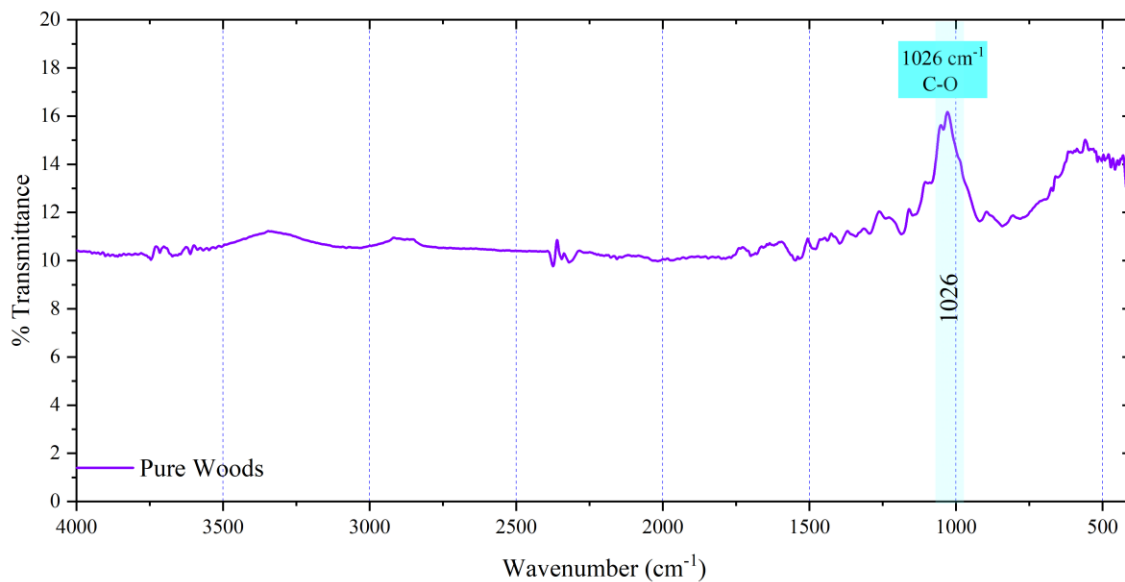
จากภาพประกอบที่ 29 แสดงถึงการวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) โดยเส้นกราฟสีดำและสีแดงบ่งบอกถึงถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส พบว่าพีคมีความกว้างที่ 2° (002) เท่ากับ 10 องศา ถึง 28 องศา และ 35 องศา ถึง 50 องศา และเส้นกราฟสีเขียวบ่งบอกถึงถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าพีคมีความกว้าง 2° (002) เท่ากับ 10 องศา ถึง 27.5 องศา และ 35 ถึง 50 องศา โดยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส นั้นผลึกมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) [53]



ภาพประกอบที่ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส

4.4 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

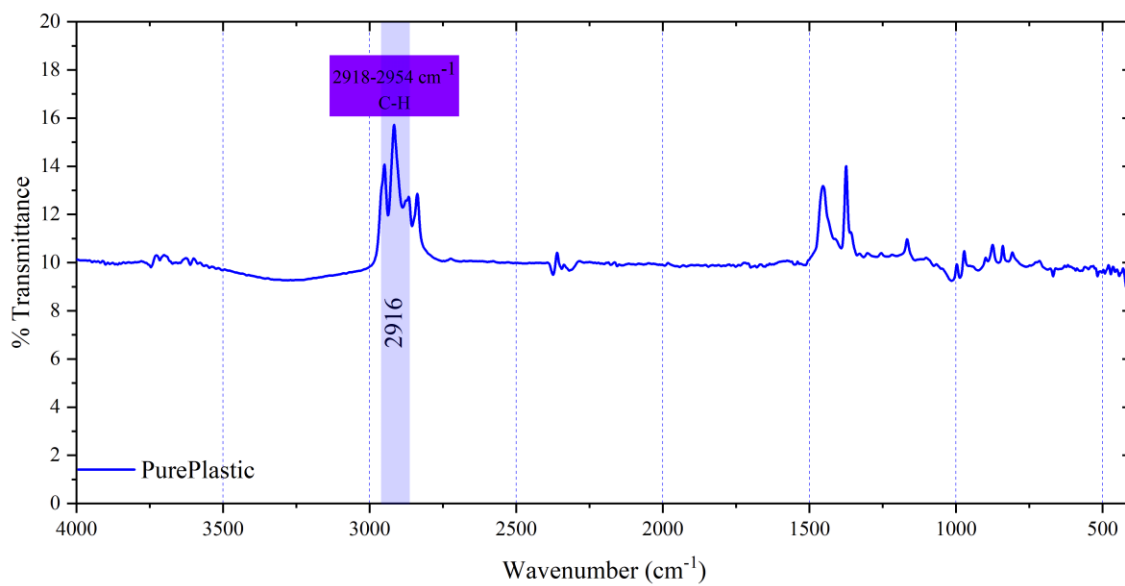
Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคทางเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสาร โดยใช้การใช้แสงอินฟราเรด (Infrared light) เพื่อช่วยในการระบุโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดซึมของแสงอินฟราเรดโดยที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถช่วยในการระบุลักษณะของพันธะทางเคมีที่อยู่ในวัสดุต่างๆได้ [54] เมื่อนำไม้ก่อนเข้าก่อนกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า นำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของไม้ก่อนเผา ขยะพลาสติก ถ่านไบโอชาร์ทั้งสามอุณหภูมิด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) จากภาพประกอบที่ 30 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทางเคมีของไม้ก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า พบว่า มีจุดพีคมากกว่า 1 จุด โดยจุดพีคที่มีค่ามากที่สุดที่มีความถี่อยู่ที่ 1026 ต่อตารางเซนติเมตร ระบุว่าเป็นเป็นการเชื่อมโยงของ C-O-C ที่เป็นลักษณะของซิลิโอสหรือฮีมิเซลลูโลส ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นส่วนประกอบหลักของไม้ [55]



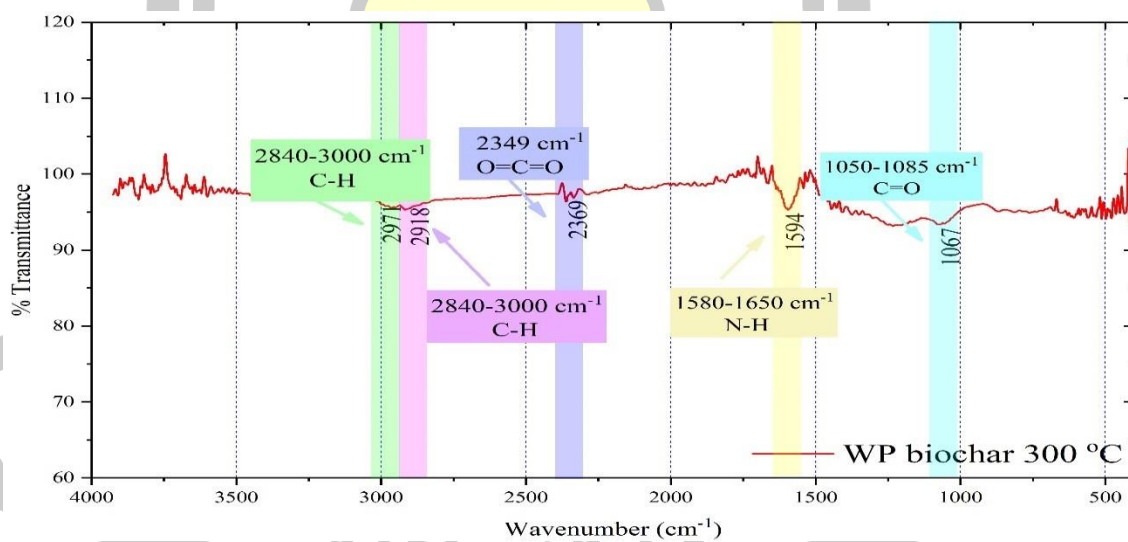
ภาพประกอบที่ 30 โครงสร้างทางเคมีของไม้ก่อนเผา

เมื่อนำขยะพลาสติก (PP) ก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า นำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) จากภาพประกอบที่ 31 พบว่ามีจุดพีคหลายจุดแต่จุดพีคที่สูงที่สุดพบว่าอยู่ที่ 2918-2954 ต่อตารางเซนติเมตร ระบุว่าเป็นฟังก์ชันนอลกรุป (C-H Stretching) ของชนิดหมู่แอลเคน (Alkane) หรือ C-H Stretching ชนิดของหมู่อัลดีไฮด์ (aldehyde) [56] ซึ่งฟังก์ชันนอลกรุปที่พบนั้นถูกระบุว่าเป็นหนึ่งในโครงสร้างของโพลีโฟสเฟนและสามารถใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการสร้างพอลิเมอร์ในกระบวนการโพลีเมอริเซชันได้ [57]

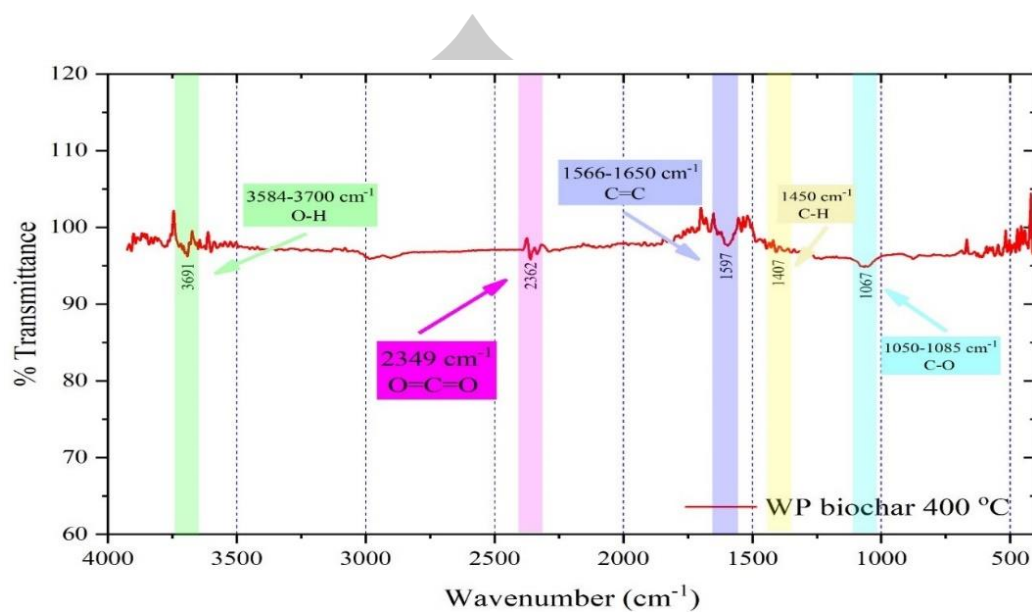
พูน ปณ จิตโต ชีเว



ภาพประกอบที่ 31 โครงสร้างทางเคมีของขยะพลาสติก (PP)

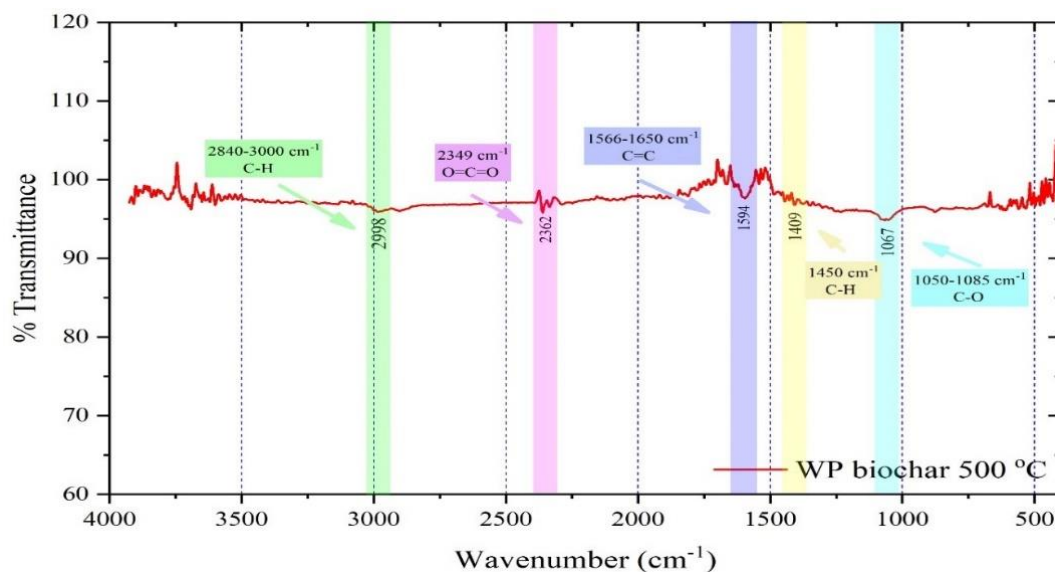


ภาพประกอบที่ 32 โครงสร้างทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)
ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 33 โครงสร้างทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



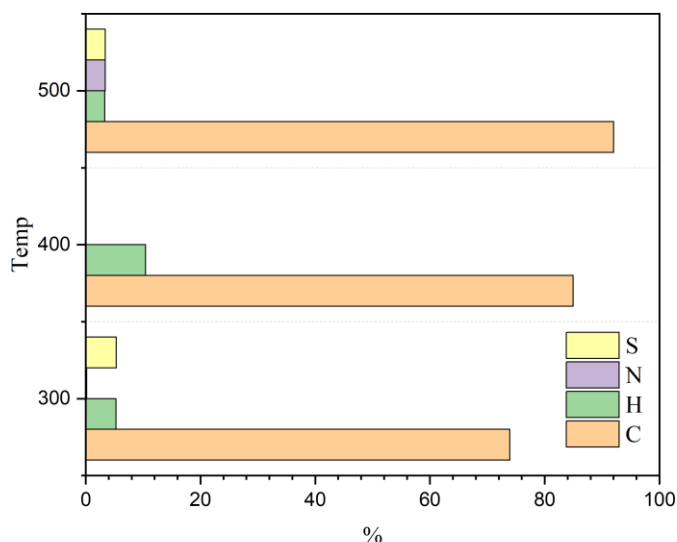


ภาพประกอบที่ 34 โครงสร้างทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่ อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อนำเข้าเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางเคมี Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ตามภาพประกอบที่ 32, 33 และ 34 แสดงให้เห็นว่า ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) มีกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวของมันซึ่งสามารถมีผลต่อการตอบสนองทางเคมีและปฏิกิริยากับสารอื่นๆ กลุ่มฟังก์ชันที่พบในถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ได้แก่ การขึ้นถึงจุดพิคสูงสุดเท่ากับ 2840-3000 ต่อตารางเซนติเมตรแสดงให้เห็นว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) คือการมีอยู่ของกลุ่มไฮดรอกซิล (O-H) จุดพิคที่ขึ้นสูงสุดถึงกลุ่มคาร์บอกซิล (-COOH) กลุ่มฟีนอลิก (-OH ที่ติดอยู่กับวงแหวนหรือกลุ่มอะโรมาติก) และกลุ่มอีเธอร์ (Ether) (-O) กลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้มีส่วนในการทำให้โครงสร้างของถ่านไบโอชาร์เกิดความเสถียรและมีปฏิกิริยาต่อสารอินทรีย์ [58] สามารถประยุกต์ไปใช้ในงานปรับปรุงดินและยังสามารถไปดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีและโลหะหนักได้

4.5 ผลการศึกษาคุณลักษณะด้วย CHNS

จากตารางที่ 4 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ของ CHNS พบว่าการทดสอบถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบของธาตุภายใน คือ C=73.932%, H=5.283%, N=0.185%, และ S=0.002% ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบของธาตุภายใน คือ C=81.115%, H=3.941%, N=0.369%, และ S=0.022% และถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบของธาตุภายใน คือ C=86.443%, H=2.599%, N=0.410%, และ S=0.012% ดังนั้นแล้วการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แม้จะใช้เวลาในการเผาที่ 1 ชั่วโมงเท่ากันทั้งสามอุณหภูมินั้นแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าได้คาร์บอนมากที่สุด แสดงว่าคาร์บอนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผา



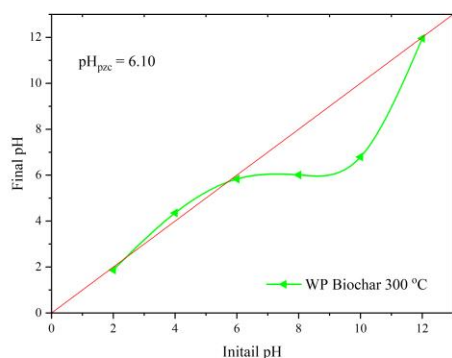
ภาพประกอบที่ 35 ลักษณะทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 ตารางแสดงลักษณะทางเคมีถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)

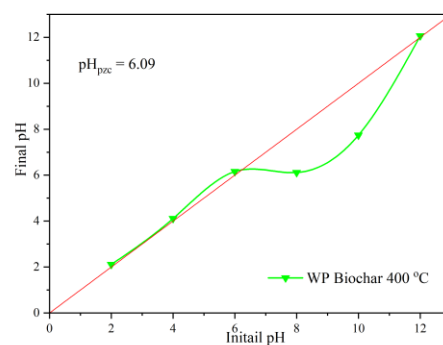
ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง	ผลการทดสอบ / รายการทดสอบ			
		Carbon (C) (%)	Hydrogen (H) (%)	Nitrogen (N) (%)	Sulfur (S) (%)
WP Biochar 300 องศา เซลเซียส	ผงสีดำ	73.932	5.283	0.185	0.002
WP Biochar 400 องศา เซลเซียส	ผงสีดำ	81.115	3.941	0.369	0.022
WP Biochar 500 องศา เซลเซียส	ผงสีดำ	86.443	2.599	0.410	0.012

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

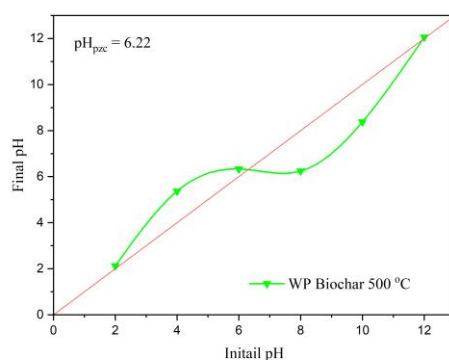
Point of Zero Charge (pH_{pzc}) คือ pH ที่พื้นผิวของวัสดุไม่มีประจุไฟฟ้าเนื่องจากการปฏิกิริยาของอนุภาคที่เป็นไอออนบนพื้นผิวกับสารละลาย ค่า PZC มักใช้ในการหาค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของวัสดุ เช่น ในการใช้วัสดุเป็นตัวทำละลายในการกรอง การแยกตัวเป็นชั้น หรือในกระบวนการปฏิกรณ์ทางเคมีและชีวภาพ [59] ผลการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge (pH_{pzc}) คือ pH ที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์เมื่อ $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ บนประจุพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ ผลการทดลองค่า pH_{pzc} ที่ได้สอดคล้องกับค่า pH ที่เหมาะสมได้จากผลการทดลอง pH ของสารละลายต่อการดูดซับของคอปเปอร์ซีเตรทมีประสิทธิภาพในการดูดซับคอปเปอร์ที่ อธิบายได้ว่า ค่า pH ของสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทเมื่อละลายน้ำได้ประจุเป็นบวก จึงถูกดูดซับด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมกับขยะพลาสติก (PP) ที่ผิวจะเป็นประจุลบ



ก)



ข)



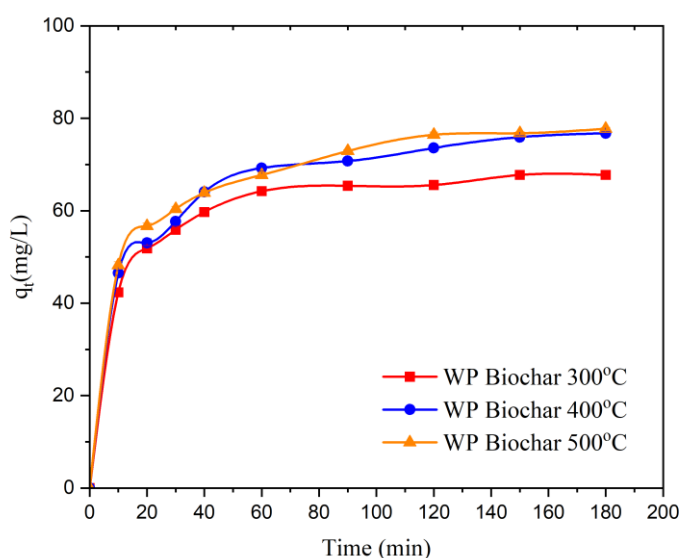
ค)

ภาพประกอบที่ 36 Point of zero charge (pHpzc) ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ ก) 300 องศาเซลเซียส , ข) 400 องศาเซลเซียส , และ ค) 500 องศาเซลเซียส

4.8 ผลการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

ผลการทดลองปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300°C, 400°C, และ 500°C จากภาพประกอบที่ 37 จะเห็นได้ว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 0 ถึง 60 นาที ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 องศา

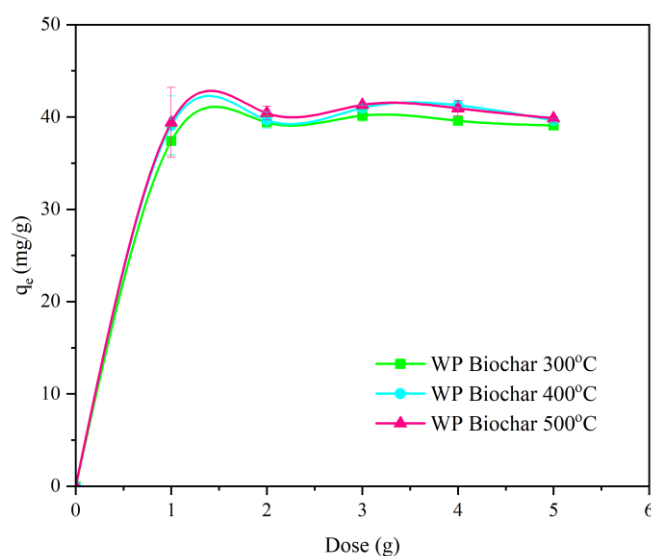
เซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 64.2267 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 69.2394 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 67.7356 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากเวลาที่ 60 นาที มีความสามารถในการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล จะสังเกตได้ว่า ถ่านไบโอชาร์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที และถ่านไบโอชาร์ที่เผาด้วยอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที มีความสามารถในการดูดซับไม่ต่างกันมาก จึงไม่จำเป็นต้องเผาถ่านถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานในการเผาและสิ้นเปลืองงบประมาณในการทำถ่านไบโอชาร์อีกด้วย



ภาพประกอบที่ 37 เวลาที่เหมาะสมในการใช้ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรท

4.9 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

ผลของปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เหมาะสมถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิที่ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส จากภาพประกอบที่ 38 อธิบายผลการทดลองได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่ปริมาณ 0 ถึง 5 กรัม พบว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เพาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับได้แก่ 0 กรัม = 0 มิลลิกรัมต่อกรัม 1 กรัม = 37.4054 มิลลิกรัมต่อกรัม 2 กรัม = 39.4219 มิลลิกรัมต่อกรัม 3 กรัม = 40.1497 มิลลิกรัมต่อกรัม 4 กรัม = 39.5946 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5 กรัม = 39.0945 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เพาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับได้แก่ 0 กรัม = 0 มิลลิกรัมต่อกรัม 1 กรัม = 39.0763 มิลลิกรัมต่อกรัม 2 กรัม = 39.6725 มิลลิกรัมต่อกรัม 3 กรัม = 40.9852 มิลลิกรัมต่อกรัม 4 กรัม = 41.2655 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5 กรัม = 39.6292 มิลลิกรัมต่อกรัม และ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เพาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับได้แก่ 0 กรัม = 0 มิลลิกรัมต่อกรัม 1 กรัม = 39.4105 มิลลิกรัมต่อกรัม 2 กรัม = 40.4244 มิลลิกรัมต่อกรัม 3 กรัม = 41.3194 มิลลิกรัมต่อกรัม 4 กรัม = 40.9397 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5 กรัม = 39.8665 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่า ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เพา ณ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีคือ 3 กรัม คือ 40.1497 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เพา ณ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีคือ 4 กรัม คือ 41.2655 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เพา ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีคือ 3 กรัม คือ 41.3194 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด จะอยู่ที่ 3 ถึง 4 กรัม เพราะว่าหากใช้ถ่านไบโอชาร์เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไม่เพิ่มตามปริมาณถ่านไบโอชาร์จึงทำให้เป็นการสิ้นเปลืองไปโดยเปล่าประโยชน์ อย่างไรก็ตามตามหลักเศรษฐศาสตร์ ความสามารถในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมนั้น จากความสามารถในการดูดซับสำหรับถ่านไบโอชาร์ทั้งสามอุณหภูมิ กล่าวว่าที่ 1 กรัม เหมาะสมกับการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซิเตรทที่ความเข้มข้นไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

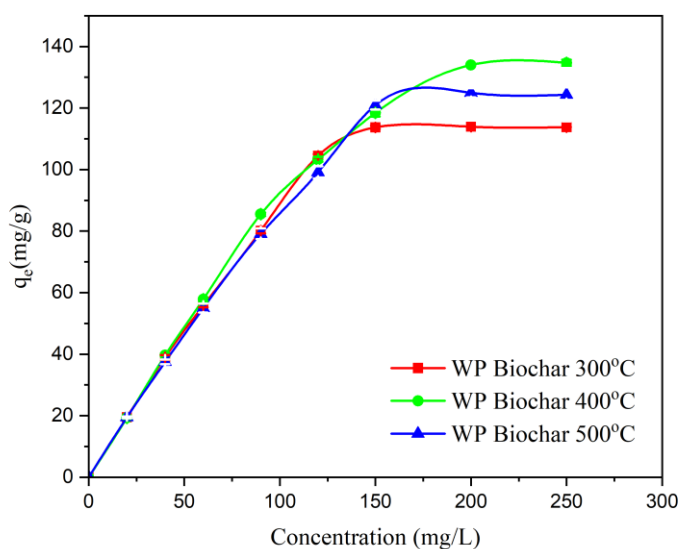


ภาพประกอบที่ 38 ปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรท

4.10 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity)

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับโดยใช้ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณถ่านไบโอชาร์ 1 กรัม ใส่สารละลายคอปเปอร์ซีเตรทที่ความเข้มข้น 0 ถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยใช้ค่าความเข้มข้นที่ 1, 2, 3, 4.5, 5, 6, 7.5, 10, และ 12.5 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น จากภาพประกอบที่ 4.10.1 ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เมื่อบ่มทิ้งไว้ครบ 24 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ซีเตรทที่ความเข้มข้น 0 ถึง 150 เท่ากับ 113.7255 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นสูงกว่นี้จะอยู่ในสถานะสมดุล ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อบ่มทิ้งไว้ครบ 24 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ซีเตรทที่ความเข้มข้น 0 ถึง 200 เท่ากับ 133.9835 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นสูงกว่นี้จะอยู่ในสถานะสมดุล ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อบ่มทิ้งไว้ครบ 24 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ซีเตรทที่ความเข้มข้น 0 ถึง 150 เท่ากับ 120.9103 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่

ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ซีเตรทได้สูงที่สุดสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.9



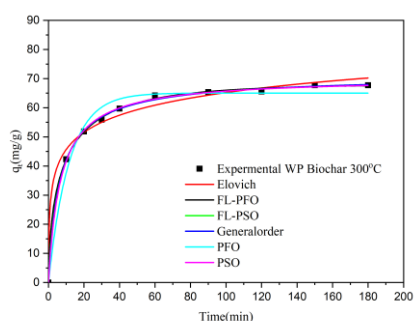
ภาพประกอบที่ 39 ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส

4.11 ผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption)

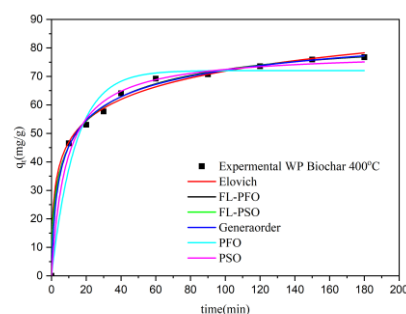
แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายและทำนายกระบวนการ การดูดซับของสารต่างๆ ที่ถูกดูดซับโดยวัสดุต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ สารเคมี และ ถ่านไบโอชาร์ เป็นต้น แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption) จะช่วยให้เข้าใจถึงความเร็วและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับได้ในระยะเวลาต่างๆ [60] การดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมจากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ได้ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทั้งหมด 6 แบบจำลอง แสดงดังภาพประกอบที่ 40 จากการศึกษาพบว่ากลไกการดูดซับ

ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส นั้น มีแนวโน้มใกล้เคียงแบบจำลองของ Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) โดยมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

โดยจากตารางที่ 5 พบว่าค่าของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) นั้น มีค่า q_e 300 องศาเซลเซียส = 68.0680, 400°C = 82.7008 และ 500°C=87.8479, K_1 300°C = 0.1577, 400°C = 0.1841 และ 500°C=0.2137, α 300°C = 0.6436, 400°C = 0.4809 และ 500°C=0.4130, RCS 300°C = 0.4774, 400°C = 1.5868 และ 500°C=0.4867, RSS 300°C = 3.3420, 400 องศาเซลเซียส = 11.1076 และ 500 องศาเซลเซียส = 3.4074, COD 300°C = 0.9991, 400°C = 0.9876 และ 500°C=0.999, และ R^2 300°C = 0.99888, 400°C = 0.997 และ 500°C = 0.9991 ซึ่งอธิบายได้ว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส นั้นมีลักษณะการดูดซับคล้ายแบบจำลองของ Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) โดยมีกระบวนการดูดซับของสารต่อพื้นผิววัตถุ โดยสารจะถูกดูดซับต่อพื้นผิววัตถุในช่วงแรกของการดูดซับ เมื่อผ่านไปแล้วสารที่ดูดซับจะขยายตัวเข้าสู่โครงสร้างของผิว โดยมีการดูดซับในทิศทางที่หลากหลาย [61]

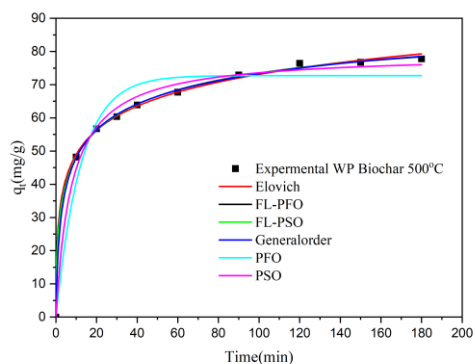


ก)



ข)

พหุ ประสิทธิภาพ



ค)

ภาพประกอบที่ 40 จลนพลศาสตร์การดูดซับทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสม
ขยะพลาสติกที่: ก) 300 องศาเซลเซียส ข) 400 องศาเซลเซียส และ ค) 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสม
ขยะพลาสติก (PP)

แบบจำลอง	สมการ	ถ่านไบโอชาร์ ที่เตรียมได้ จากเศษไม้ ผสมขยะ พลาสติก (PP) 300 องศาเซลเซียส	ถ่านไบโอชาร์ ที่เตรียมได้ จากเศษไม้ ผสมขยะ พลาสติก (PP) 400 องศาเซลเซียส	ถ่านไบโอชาร์ ที่เตรียมได้ จากเศษไม้ ผสมขยะ พลาสติก (PP) 500 องศาเซลเซียส
Pseudo first order (PFO)				
q_e		65.0473	72.0617	72.7483
K_1		0.0864	0.0735	0.0814
Reduced Chi-Sqr (RCS)		8.6458	23.802	26.2148
Residual Sum of Squares (RSS)		69.1670	190.4223	209.7187
R-Square (COD)		0.9819	0.9599	0.9568

R^2		0.9797	0.9549	0.9514
Pseudo second order (PSO)				
q_e		70.251	78.6519	79.3003
K_2		0.0020	0.0014	0.0016
Reduced Chi-Sqr (RCS)		0.6142	5.0542	5.0892
Residual Sum of Squares (RSS)		4.9136	40.4338	40.7136
R-Square (COD)		0.9987	0.9915	0.9916
R^2		0.9985	0.9904	0.9905
General (rational) order				
q_e		71.7542	112.7224	132.5892
K_r		8.8323	5.3528	9.9207
n		2.2129	5.3528	7.3174
Reduced Chi-Sqr (RCS)		0.6232	1.8982	0.5867
Residual Sum of Squares (RSS)		4.3630	13.2878	4.1072
R-Square (COD)		0.9988	0.9972	0.9991
R^2		0.9985	0.9964	0.9989
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)				
q_e		68.0680	82.7008	87.8479
K_1		0.1577	0.1841	0.2137
α		0.6436	0.4809	0.4130
Reduced Chi-Sqr (RCS)		0.4774	1.5868	0.4867
Residual Sum of Squares (RSS)		3.3420	11.1076	3.4074
R-Square (COD)		0.9991	0.9876	0.999
R^2		0.9988	0.997	0.9991

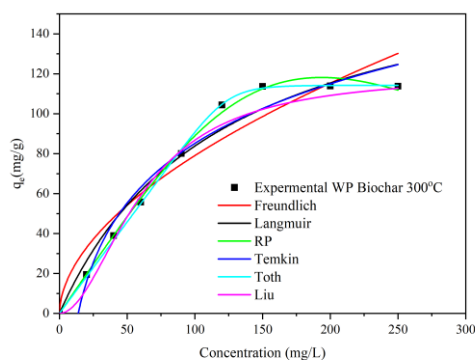
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)				
q_e		71.4023	93.7115	101.0166
K_2		0.0024	0.0028	0.0030
α		0.9072	0.5516	0.4649
Reduced Chi-Sqr (RCS)		0.5989	1.7127	0.5275
Residual Sum of Squares (RSS)		4.1925	11.9892	3.36931
R-Square (COD)		0.9989	0.9974	
R^2		0.9986	0.9967	0.9990
Elovich				
$\alpha_{(e)}$		181.2306	80.4136	110.8843
$\beta_{(e)}$		0.1175	0.0919	0.0952
Reduced Chi-Sqr (RCS)		4.7562	2.3541	0.8161
Residual Sum of Squares (RSS)		38.0496	18.8334	6.5294
R-Square (COD)		0.9900	0.9960	0.9986
R^2		0.9888	0.9955	0.9984

4.12 ผลการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

แบบจำลองของไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายและทำนายกระบวนการดูดซับของสารต่างๆ โดยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับปริมาณสารที่เหลืออยู่ในสภาพคงที่ในที่สุดดูดซับ แบบจำลองนี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ เช่น กระบวนการกำจัดสารเคมีในน้ำ เป็นต้น จากภาพประกอบที่ 41 ก) ศึกษาแบบจำลองของไอโซเทอมการดูดซับการดูดซับสารละลายคอปิเตอร์ด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้การศึกษานำเข้าแบบจำลองไอโซเทอม ทั้งหมด 6 แบบจำลองปรากฏว่าจากตารางที่ 6 พบว่าค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดคือแบบจำลองของ Toth โดยมีค่า

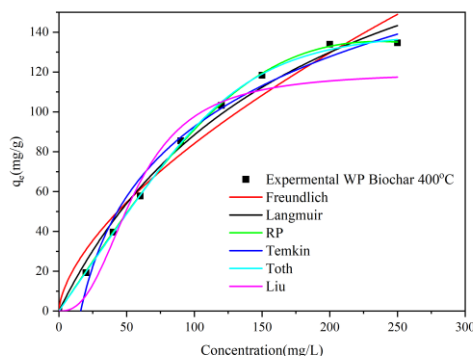
$q_m=114.2457$, $K_{th}=0.0080$, $n_{th}=10.5748$, $RCS=2.1635$, $RSS=12.9813$ และ R^2 เท่ากับ 0.99889 จึงอธิบาย ลักษณะการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีลักษณะการดูดซับที่ซับซ้อน มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [62]

จากภาพประกอบที่ 41 ข) และ ค) ศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ ด้วยการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดคือแบบจำลอง Redlich – Peterson โดยค่า K_p 400 องศาเซลเซียส =1.0023, 500 องศาเซลเซียส=0.9283, α , 400 องศาเซลเซียส =2.1892, 500 องศาเซลเซียส=7.0910, b 400 องศาเซลเซียส=2.3319, 500 องศาเซลเซียส=7.0910, RCS 400 องศาเซลเซียส =1.2055, 500 องศาเซลเซียส=5.5117, RSS 400 องศาเซลเซียส =7.2328, 500 องศาเซลเซียส=33.0703, COD 400 องศาเซลเซียส =0.9996, 500 องศาเซลเซียส=0.9982, และ R^2 เท่ากับ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.99952 และ 500 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.99975 แสดงดังตารางมี 6 จึงอธิบายได้ว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรกและหลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง [63]

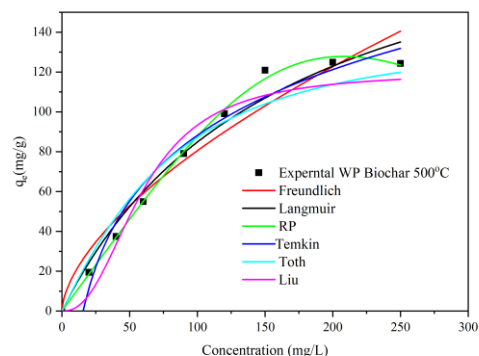


ก)

พูน ปณ จิโต ชเว



ข)



ค)

ภาพประกอบที่ 41 ไอโซเทอมการดูดซับในการดูดซับทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติกที่ ก) 300 องศาเซลเซียส ข) 400 องศาเซลเซียส และ ค) 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)

แบบจำลอง	สมการ	300 องศาเซลเซียส	400 องศา เซลเซียส	500 องศา เซลเซียส
Freundlich				
k_f		6.4243	4.7393	4.8963
n_f		1.8350	1.6014	1.6450
Reduced Chi-Sqr (RCS)		157.3846	93.7591	127.4035
Residual Sum of Squares (RSS)		1101.6920	656.3139	891.8244
R-Square (COD)		0.9296	0.9673	0.9508
R^2		0.9196	0.9626	0.9438
Langmuir				
q_m		184.9735	244.6382	223.4362
K_1		0.0083	0.0057	0.0061
Reduced Chi-Sqr (RCS)		75.1798	33.5099	60.9547

Residual Sum of Squares (RSS)		526.2588	234.5694	426.6831
R-Square (COD)		0.9664	0.9883	0.9765
R^2		0.9616	0.9866	0.9731
Temkin				
b_t		0.0722	0.0621	0.0636
k_t		43.0678	50.6958	47.6695
Reduced Chi-Sqr (RCS)		69.2558	40.1528	66.2354
Residual Sum of Squares (RSS)		484.7903	281.0694	463.6475
R-Square (COD)		0.9690	0.9860	0.9744
R^2		0.9646	0.9840	0.9708
Liu				
q_m		120.0000	120.0000	120.0000
k_g		0.0163	0.0018	0.0168
n_g		1.9495	2.5665	2.4014
Reduced Chi-Sqr (RCS)		54.1791	157.0648	100.3324
Residual Sum of Squares (RSS)		325.0746	942.3888	601.9942
R-Square (COD)		0.9792	0.9531	0.9668
R^2		0.9723	0.9374	0.9557
Toth				
q_m		114.2457	141.1257	140.0000
k_{th}		0.0080	0.0069	0.0098
n_{th}		10.5748	3.6438	1.5000
Reduced Chi-Sqr (RCS)		2.1635	2.5255	113.7717
Residual Sum of Squares (RSS)		12.9813	15.1528	682.6302
R-Square (COD)		0.9992	0.9993	0.9623
R^2		0.9989	0.9990	0.9498
Redlich - Peterson				
k_{rp}		0.9855	1.0023	0.9283
α_r		6.0588	2.1892	7.0910
b		2.6263	2.3319	2.9581

Reduced Chi-Sqr (RCS)		7.2032	1.2055	5.5117
Residual Sum of Squares (RSS)		43.2193	7.2328	33.0703
R-Square (COD)		0.9972	0.9996	0.9982
R^2		0.9963	0.9995	0.9998

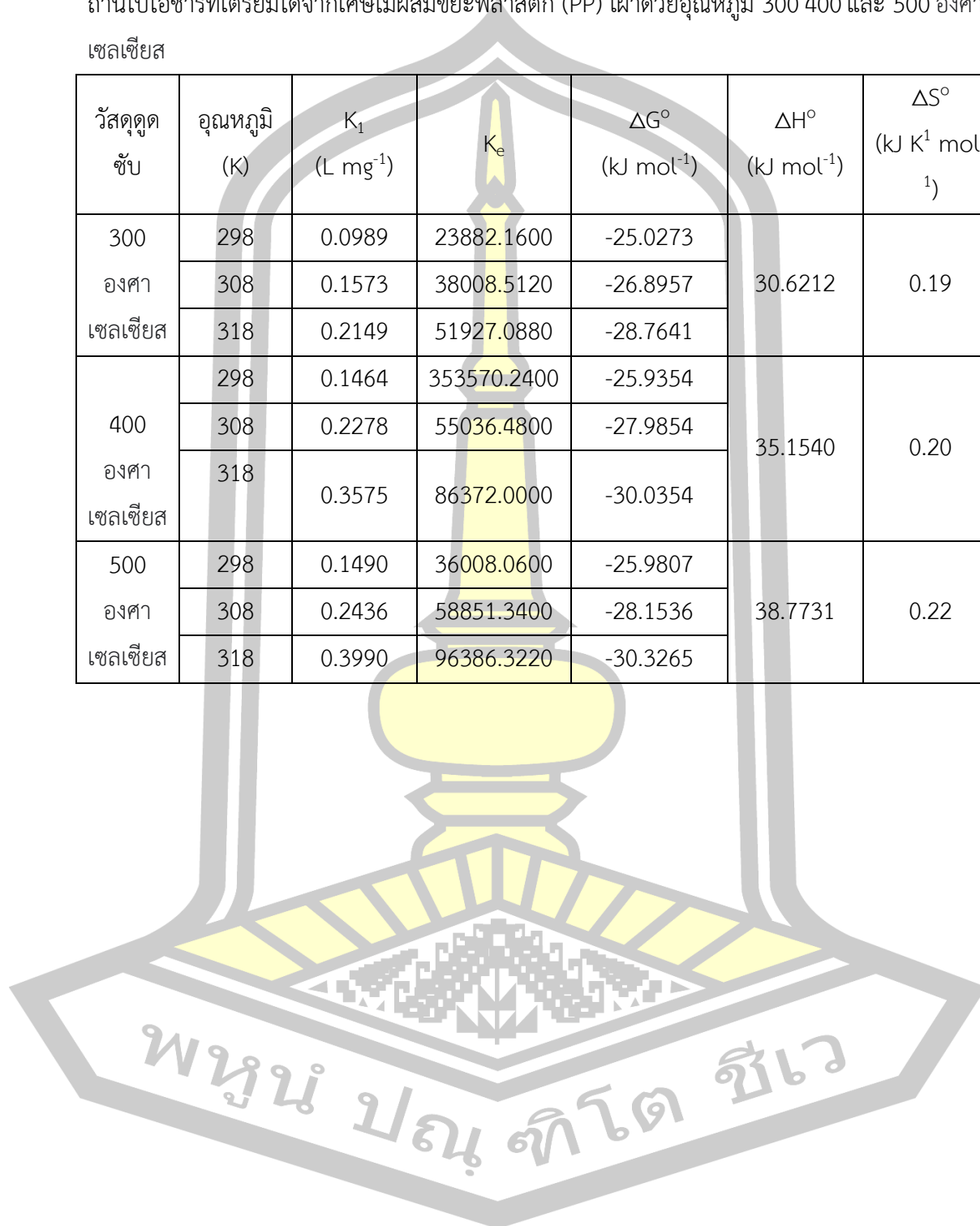
4.13 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับ (Thermodynamic adsorption)

การพิจารณาทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกของกระบวนการดูดซับเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อสรุปว่ากระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองหรือไม่ การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ΔG^0 , เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาเคมีและเป็นเกณฑ์สำคัญสำหรับความเป็นไปได้ ต้องพิจารณาทั้งปริมาณความร้อน (ΔH^0) และปริมาณเอนโทรปี (ΔS^0) เพื่อกำหนดค่า ΔG^0 ของกระบวนการ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยอุณหภูมิต่ออุณหภูมิหนึ่งถ้า ΔG^0 เป็นค่าลบ พลังงาน ΔG^0 ของกระบวนการดูดซับเกี่ยวข้องกับค่าคงที่สมดุลทางเคมีตามสมการ Van't Hoff [64, 65]

ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิก แสดงดังตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกระหว่าง โดยค่า ΔH^0 มีค่า 300 องศาเซลเซียส = 30.6212 kJ mol⁻¹, 400 องศาเซลเซียส = 35.15408 kJ mol⁻¹, และ 500 องศาเซลเซียส = 38.77317 kJ mol⁻¹ นั้นบ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับนั้นมีการปลดปล่อยพลังงานออก (Exothermic) [64] โดยค่า ΔS^0 ถ่านไบโอชาร์เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส = 0.19 kJ K⁻¹ mol⁻¹, 400 องศาเซลเซียส = 0.20 kJ K⁻¹ mol⁻¹, และ 500 องศาเซลเซียส = 0.22 kJ K⁻¹ mol⁻¹ นั้นแสดงว่ากระบวนการดูดซับนั้นมีความไม่เรียบเรียงของโมเลกุลหรืออนุภาคการดูดซับเกิดขึ้นของกระบวนการดูดซับเอง [64] และค่า ΔG^0 ถ่านไบโอชาร์เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส = -25.02725 ถึง -28.76406 kJ mol⁻¹, 400 องศาเซลเซียส = -23.9354 ถึง -30.03537 kJ mol⁻¹, และ 500 องศาเซลเซียส = -25.98065 ถึง -30.32654 kJ mol⁻¹ นั้นหมายความว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดูดซับแบบกายภาพ [66, 67]

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทของ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส

วัสดุดูดซับ	อุณหภูมิ (K)	K_1 (L mg ⁻¹)	K_e	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (kJ K ⁻¹ mol ⁻¹)
300 องศาเซลเซียส	298	0.0989	23882.1600	-25.0273	30.6212	0.19
	308	0.1573	38008.5120	-26.8957		
	318	0.2149	51927.0880	-28.7641		
400 องศาเซลเซียส	298	0.1464	353570.2400	-25.9354	35.1540	0.20
	308	0.2278	55036.4800	-27.9854		
	318	0.3575	86372.0000	-30.0354		
500 องศาเซลเซียส	298	0.1490	36008.0600	-25.9807	38.7731	0.22
	308	0.2436	58851.3400	-28.1536		
	318	0.3990	96386.3220	-30.3265		



บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองการดูดซับทองแดงในรูปแบบสารละลายกรดด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) ที่มีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, และ 500°C จากการทดลองศึกษาสรุปได้ว่า การดูดซับทองแดงที่มีการปนเปื้อนแหล่งน้ำเป็นเรื่องที่น่าศึกษาค้นคว้าอย่างยิ่ง โดยการนำเศษไม้ที่เหลือทิ้งจากไซค์งานก่อสร้าง โรงงานเฟอร์นิเจอร์และขยะพลาสติก (PP) ที่เหลือจากกระบวนการขึ้นรูปเม็ดพลาสติก โดยวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไม่สามารถนำไปประโยชน์ได้แล้ว ซึ่งปัจจุบันเริ่มมีการหันมาณรงค์ให้ลดขยะ Zero Waste กันมากขึ้นสิ่งที่ได้จากการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ใช้หลักการศึกษา ลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมจากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ก่อนและหลังเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) โดยใช้เครื่องมือศึกษาคือ Scanning electron microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX), X-ray diffraction (XRD), Brunauer-Emmett-Teller (BET), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), และ CHNS แล้วนอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทในรูปแบบสารละลายโดนใช้ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) โดยขอบเขตการศึกษามีดังนี้ Point of zero charge (pH_{pzc}), ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ, ปริมาณตัวดูดซับ, ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity), แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption), แบบจำลองของไอโซเทอมการดูดซับ (Isotherm Adsorption), และ เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับ (Thermodynamic Adsorption) ผลการศึกษาได้ผลดังต่อไปนี้

5.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้ด้วยการกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process)

ลักษณะทางกายภาพของเศษไม้ก่อนนำเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า มีลักษณะสีสีน้ำตาลอ่อน เส้นใยมีการเรียงตัวขนาดแล้วแต่การผ่านการใช้งานมา ไม่มีวัตถุเจือปนมา ลักษณะทางกายภาพของขยะพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการขึ้นรูปเม็ดพลาสติก ประเภท โพลีโพรพิลีน มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ รูปทรงสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมแตกต่างกันออกไป มีหลากหลายสี น้ำหนักเบาและ วัสดุทั้งสองไม่สามารถนำมาบดละเอียดได้ เมื่อนำวัสดุทั้งสองเข้ากระบวนการ

แยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าแล้ว พบว่าลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์นั้น มีสีดำมันวาว เป็นเพราะขยะพลาสติกหลอมละลายเข้าไปเกาะในไม้มีน้ำหนักที่เบาลงตัวถ่านมีการยึดจับกัน สามารถนำมาบดให้เป็นผงเพื่อนำไปศึกษาต่อได้

เมื่อนำเศษไม้ก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าเข้าเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) โดยใช้กำลังขยายที่ 25x, 250x, และ 500x พบว่าโครงสร้างนั้นมีการเรียงตัวของเซลล์ไม้และเส้นใยของไม้ เป็นเส้นตรงอย่างชัดเจนไม่พบรูพรุน ขยะพลาสติก (PP) มีลักษณะโครงสร้างเป็นขุย เนื่องจากกระบวนการผลิต เส้นใยเรียงตัวสลับกันไปมามีขนาดเล็กใหญ่ แตกต่างกันไปเพราะผ่านกระบวนการบดสับมาแล้ว ไม่พบรูพรุนเช่นเดียวกับไม้

เมื่อนำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เข้าเครื่องวิเคราะห์ Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง มีลักษณะพื้นผิวมีช่องว่างกึ่งกลม กึ่งรี ขนาดช่องว่างนั้นไม่สม่ำเสมอ เล็กใหญ่แตกต่างกันออกไป แต่มีความพรุนอยู่ทั้งสามอุณหภูมิ หากอุณหภูมิที่ใช้เผานั้นสูง แนวโน้มของรูพรุนนั้นจะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

นำเศษไม้ก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้ามาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) พบว่าธาตุประกอบในเศษไม้ก่อนเข้ากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้านี้มี C=58.04%, O=40.21%, และ Al=1.76% และนำขยะพลาสติก (PP) มาวิเคราะห์พบว่า C=88.02%, O=7.87%, F=0%, Al=0.54, Ca=3.44%, และ Ga=0.14%

ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) พบว่า ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมด้วยเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นั้น พบ C=72.48%, O=19.51%, Al=5.31%, Ca=2.70%, ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมด้วยเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นั้น พบ C=84.98%, O=10.42%, Ca=2.14%, และ Cl=1.14%, และ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมด้วยเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นั้น พบ C=92.03%, O=3.32%, Al=3.43%, และ Cl=1.22%มากกว่านั้นพบว่าถ่านที่เตรียมเป็นไอโซเทอมประเภทที่ 3 (Type III) ระบุว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพบนพื้นผิว เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงที่สุด และ ยังมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนนั้นสูงที่สุดอีก นั้นจึงบ่งบอกได้ว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบแล้วไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส เพราะอาจจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานได้ และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างน้อย X-ray diffraction (XRD) ส่องผ่านรังสีเอ็กซ์พบว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาที่อุณหภูมิ 300

และ 400 องศาเซลเซียส พบว่าพีคมีความกว้างที่ 2° (002) เท่ากับ 10 องศา ถึง 28 องศา และ 35 องศา ถึง 50 องศา และ ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) เฝ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าพีคมีความกว้าง 2° (002) เท่ากับ 10 องศา ถึง 27.5 องศา และ 35 ถึง 50 องศา โดยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้และขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส นั้นผลึกมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon)

ลักษณะถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เฝ้าด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีแสดงให้เห็นว่าบนพื้นผิวของมันซึ่งสามารถมีผลต่อการตอบสนองทางเคมีและปฏิกิริยากับสารอื่นๆ กลุ่มฟังก์ชันที่พบในถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ได้แก่ การขึ้นถึงจุดพีคสูงสุดเท่ากับ 2840-3000 ต่อตารางเซนติเมตรแสดงให้เห็นว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) คือการมีอยู่กลุ่มไฮดรอกซิล (O-H) จุดพีคที่ขึ้นสูงสุดถึงกลุ่มคาร์บอกซิล (-COOH) กลุ่มฟีนอลิก (-OH ที่ติดอยู่กับวงแหวนหรือกลุ่มอะโรมาติก) และกลุ่มอีเธอร์ (Ether) (-O) กลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้มีส่วนในการทำให้โครงสร้างของถ่านไบโอชาร์เกิดความเสถียรและมีปฏิกิริยาต่อสารอินทรีย์สามารถประยุกต์ไปใช้ในงานปรับปรุงดินและยังสามารถไปดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีและโลหะหนักได้ ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ของ CHNS พบว่าการทดสอบถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบของธาตุภายในมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักแสดงให้เห็นได้ว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียม ได้มีคุณสมบัติเป็นคาร์บอนอสัณฐาน สรุปได้ว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้สมบัติความพรุนนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ปรับปรุงดินเพราะช่องว่างในพื้นผิวจะเป็นตัวยึดเหนี่ยวของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและธาตุอาหารต่างๆ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปกำจัดน้ำเสียที่มีสารเคมีปนเปื้อน และมีโลหะหนักปนเปื้อนได้

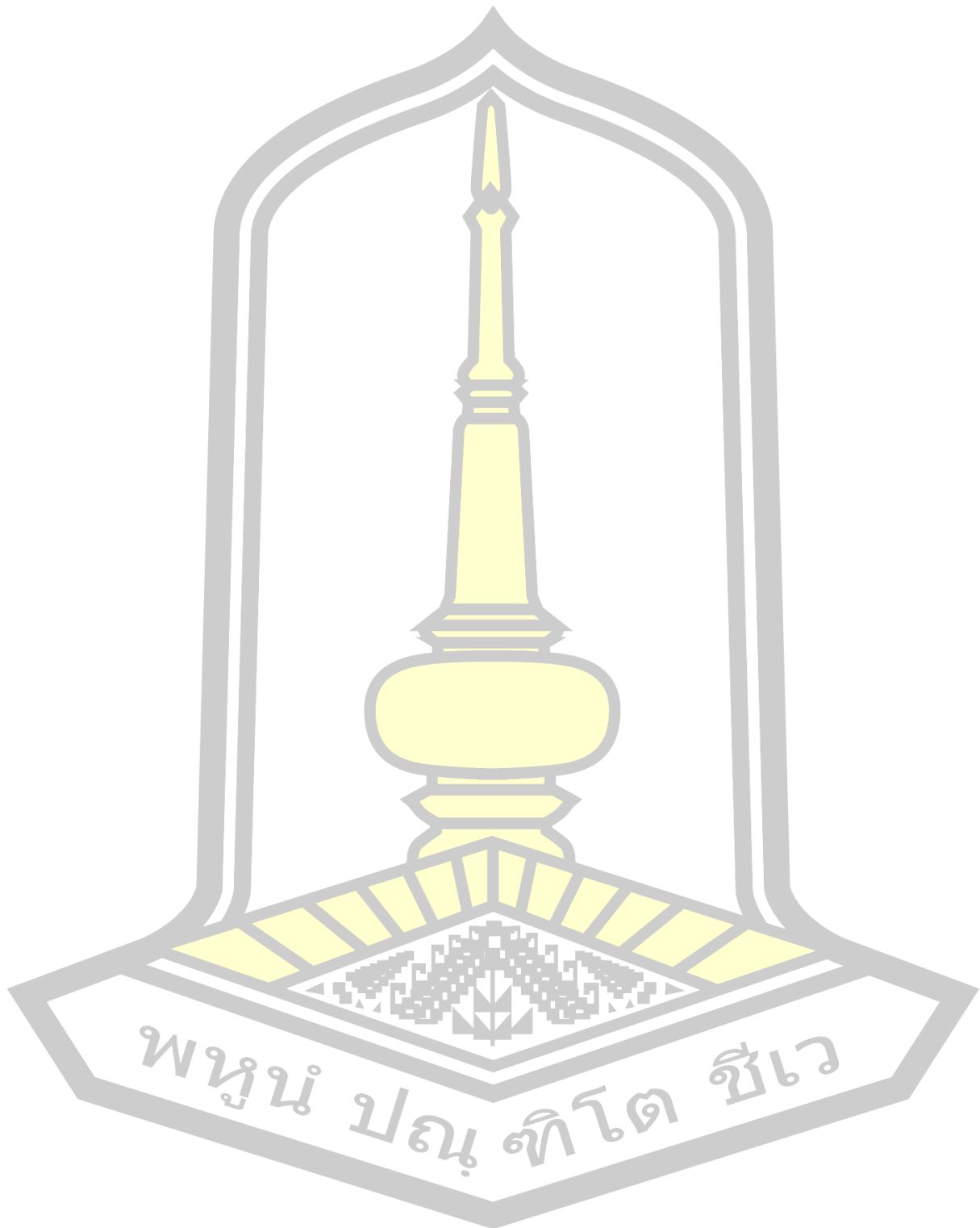
5.2 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP)

จากการทดลองศึกษาการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เฝ้าด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าผล Point of zero charge (pH_{pzc}) ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ทั้งสามอุณหภูมินั้น มีค่า Point of zero charge (pH_{pzc}) อยู่ระหว่าง 6 ถึง 6.5 ระยะเวลาที่เริ่มเข้าสู่

สภาวะสมดุลคือ นาที่ที่ 60 โดยถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถดูดซับ สารละลายคอปเปอร์ซิเตรทได้มากที่สุด นั่นคือ 69.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการออกแบบทางวิศวกรรม นั้น จากความสามารถในการดูดซับสำหรับถ่านไบโอชาร์ทั้งสามอุณหภูมินั้นอยู่ที่ 1 กรัม เหมาะสมการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซิเตรทที่ความเข้มข้นไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำถ่านไบโอชาร์ทั้งสามอุณหภูมิมาเปรียบเทียบแล้วพบว่าถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นั้นมีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด นำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) โดยมีกระบวนการดูดซับของสารต่อพื้นผิววัตถุ โดยสารจะถูกลดดูดซับต่อพื้นผิววัตถุในช่วงแรกของการดูดซับ เมื่อผ่านไปแล้วสารที่ดูดซับจะขยายตัวเข้าสู่โครงสร้างของผิว โดยมีการดูดซับในทิศทางที่หลากหลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับกลับพบว่า ถ่านไบโอชาร์ที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส คล้ายกับแบบจำลองของ Toth ลักษณะการดูดซับที่ซับซ้อน มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส นั้นคล้ายกับแบบจำลองของ Redlich – Peterson คือการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรกและหลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงและเมื่อทำการทดลองศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับแล้วพบว่ากระบวนการดูดซับนั้นมีความไม่เรียบเรียงของโมเลกุลหรืออนุภาคการดูดซับเกิดขึ้นของกระบวนการดูดซับเอง จึงบ่งบอกได้ว่า ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษไม้ผสมขยะพลาสติก (PP) ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นการดูดซับทางกายภาพ สรุปได้ว่าถ่านที่เตรียมมีความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำเสียได้ดีเนื่องจากถ่านที่เตรียมได้มีโครงสร้างที่มีพื้นผิว (porous surface) ซึ่งทำให้มีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับน้ำเสียหรือสารเคมีได้โดยมีปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้ถ่านในการควบคุมและดูดซับน้ำเสียหรือสารเคมีในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำของสารเคมีในหน่วยบำบัดน้ำเสียต่างๆ ได้



บรรณานุกรม



1. Zou, Y., et al. Environmental Remediation and Application of Nanoscale Zero-Valent Iron and Its Composites for the Removal of Heavy Metal Ions. 2016; Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b01897>.
2. Argun, M.E., et al., Heavy metal adsorption by modified oak sawdust: Thermodynamics and kinetics. Journal of hazardous materials, 2007. 141(1): p. 77-85.
3. Singh, E., et al., Pyrolysis of waste biomass and plastics for production of biochar and its use for removal of heavy metals from aqueous solution. Bioresource Technology, 2021. 320: p. 124278.
4. Energyvision. พลังงานชีวมวล. Available from: <http://www.energyvision.co.th>.
5. สุกสว่าง, ร.ด.อ. and ศ. ศิริสิงห์, Biochar application to soil improvement for agriculture.
6. เจริญสุข, จ.ว., พฤติกรรม ผู้ซื้อ ในการ เลือก ซื้อ วัสดุ ก่อสร้าง ประเภท ไม้ กรณี ศึกษา บริษัท เชียงใหม่ สุขสวัสดิ์ ค่า ไม้ จำกัด.
7. สิงห์, ศ.ล.ศ. and ร.ศ.ด.พ.บ. พัฒนา, การ ประยุกต์ ถ่าน ชีวภาพ ใน การ ปรับปรุง ดิน เพื่อ การเกษตร. วารสาร สังคมศาสตร์ และ มนุษยศาสตร์ (Journal of Social Sciences and Humanities), 2015. 4(2): p. 212.
8. สุวรรณบลนุกูล, พ. and P.N.S.A.S.C.f. Education. ถ่านชีวภาพ. 2023; Available from: <https://www.ay-sci.go.th/aynew/620531-1/>.
9. Mahltig, B., et al., Functionalising wood by nanosol application. Journal of Materials Chemistry, 2008. 18(27): p. 3180-3192.
10. Wiedenhoef, A.C. and R.B. Miller, Structure and function of wood. Handbook of wood chemistry and wood composites, 2005: p. 9-33.
11. Jeguirim, M. and L. Limousy, Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications. 2019: Elsevier Science.
12. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ไม้(wood). 2021.
13. Thiounn, T. and R.C. Smith, Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. Journal of Polymer Science, 2020. 58(10): p. 1347-1364.
14. Li, W.C., H. Tse, and L. Fok, Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. Science of the total environment, 2016. 566: p. 333-349.

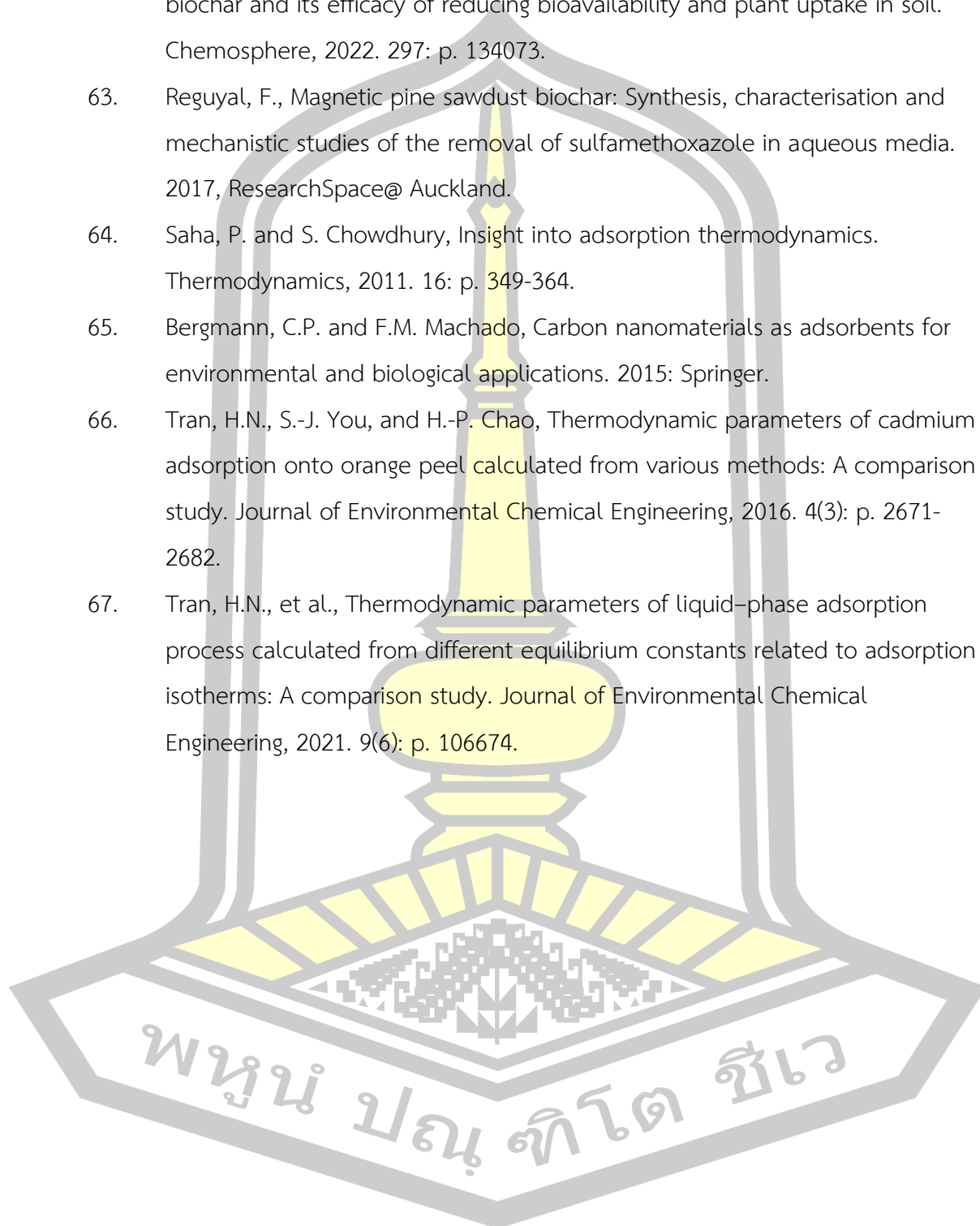
15. MacArthur, E., Beyond plastic waste. 2017, American Association for the Advancement of Science. p. 843-843.
16. Medicine, T.N.A.o.S.E., Global Ocean Plastic Waste. 2023.
17. อิศระ ว่องกุลสกุลกิจ, ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเฉียงเหนือ(Northeastern Economic Corridor : NeEC – Bioeconomy)ศักยภาพ โอกาส และความท้าทาย. 2021.
18. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ก.ป.ค.ด. ขยะพลาสติก. Available from: <https://www.pcd.go.th/laws/11381>.
19. ศิลปอาชา, ว. ข้อมูลขยะมูลฝอย ปี 2552-2561. Available from: <https://prd.go.th/th/file/get/file/202107314c79a6fead89b92db35a6803c9114cf0195710.pdf>.
20. Moore, C. plastic pollution. 2023; Available from: <https://www.britannica.com/science/noise-pollution>.
21. Hester, R.E., R.M. Harrison, and R.S.o. Chemistry, Marine Pollution and Human Health. 2011: Royal Society of Chemistry.
22. ปิตุยะ, ด.ต.พ., เอกสารองค์ความรู้ เรื่อง ถ่านชีวภาพ. 2014.
23. Pulido-Novicio, L., et al., Adsorption capacities and related characteristics of wood charcoals carbonized using a one-step or two-step process. Journal of wood science, 2001. 47: p. 48-57.
24. Lehmann, J. and S. Joseph, Biochar for environmental management: science, technology and implementation. 2015: Routledge.
25. Abrol, V. and P. Sharma, Biochar: An Imperative Amendment for Soil and the Environment. 2019: IntechOpen.
26. วีรณรงค์กร, ก. and ด.อ. อารณวิธานพ, ไพโรไลซิส (Pyrolysis). 2015.
27. Venderbosch, R. and W. Prins, Fast pyrolysis technology development. Biofuels, bioproducts and biorefining, 2010. 4(2): p. 178-208.
28. Grassi, M., et al., Removal of emerging contaminants from water and wastewater by adsorption process. Emerging compounds removal from wastewater: natural and solar based treatments, 2012: p. 15-37.
29. ช้องสาย, ส., การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้จากใบจากมวนยาสูบ. 2561.

30. Hu, Z., et al., Chromium adsorption on high-performance activated carbons from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 2003. 31(1): p. 13-18.
31. สุวรรณ, ว.ว.จ., ประสิทธิภาพ การ ดูด ซึบ ไอออน ตะกั่ว จาก สารละลาย โดยใช้ อิฐ มวล เบา เป็น ตัว ดูด ซึบ. 2016.
32. Elwakeel, K.Z., Magnesium sorption onto titan yellow supported on classic thiourea-formaldehyde resin. *Aswan University Journal of Environmental Studies*, 2020. 1(2): p. 125-136.
33. Rudzinski, W. and T. Panczyk, Kinetics of isothermal adsorption on energetically heterogeneous solid surfaces: a new theoretical description based on the statistical rate theory of interfacial transport. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000. 104(39): p. 9149-9162.
34. Aharoni, C. and M. Ungarish, Kinetics of activated chemisorption. Part 1.—The non-elowichian part of the isotherm. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1976. 72: p. 400-408.
35. Azizian, S., Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of colloid and Interface Science*, 2004. 276(1): p. 47-52.
36. Marczewski, A.W., Analysis of kinetic Langmuir model. Part I: integrated kinetic Langmuir equation (IKL): a new complete analytical solution of the Langmuir rate equation. *Langmuir*, 2010. 26(19): p. 15229-15238.
37. Haerifar, M. and S. Azizian, An exponential kinetic model for adsorption at solid/solution interface. *Chemical engineering journal*, 2013. 215: p. 65-71.
38. Haerifar, M. and S. Azizian, Fractal-like adsorption kinetics at the solid/solution interface. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012. 116(24): p. 13111-13119.
39. Davis, J.R. and A.S.M.I.H. Committee, *Copper and Copper Alloys*. 2001: ASM International.
40. MGRONLINE. แดนจ้งไกรระงับการสอนใน 80 ร.ร.นานนับสัปดาห์ หลังสารเคมีมหาศาล “รั่ว” จนแม่น้ำเป็นพิษ. Available from: <https://mgronline.com/around/detail/9570000094513>.
41. Ruthven, D.M., *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. 1984: Wiley.

42. Sartape, A.S., et al., Removal of malachite green dye from aqueous solution with adsorption technique using Limonia acidissima (wood apple) shell as low cost adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017. 10: p. S3229-S3238.
43. Miandad, R., et al., Untapped conversion of plastic waste char into carbon-metal LDOs for the adsorption of Congo red. *Journal of colloid and interface science*, 2018. 511: p. 402-410.
44. Aboul-Gheit, A., F. Khalil, and T. Abdel-Moghny, Adsorption of spilled oil from seawater by waste plastic. *Oil & gas science and technology*, 2006. 61(2): p. 259-268.
45. Çepelioğullar, Ö. and A.E. Pütün, Thermal and kinetic behaviors of biomass and plastic wastes in co-pyrolysis. *Energy conversion and management*, 2013. 75: p. 263-270.
46. SAECHIAM, S. and G. Sripongpun, ADSORPTION OF MALACHITE GREEN AND REACTIVE RED 31 FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY USING BANANA PEEL ADSORBENTS. 2019, Silpakorn University.
47. Dhar, S.A., T.U. Sakib, and L.N. Hilary, Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022. 12(7): p. 2631-2647.
48. ชัย, ก.ฐธ., รูปแบบ และ กลยุทธ์ การ ประกอบ การ ผลิต เม็ด พลาสติก รีไซเคิล: บริษัท ไซ เคิล พ ลา ส จำกัด. 2013, มหาวิทยาลัย ศิลปากร.
49. ชุกกลิ่น, ณ.น.ก.แ.แ., et al., การ ผลิต ไบ โอชา ร จาก กะลา มะพร้าว และ ศักยภาพ ใน การ ส่ง ผล ต่อ การ ปรับปรุง คุณภาพ ดิน เพื่อ การ เพาะ ปลูก ต้น มะเขือ ม่วง. วารสาร บัณฑิต วิจัย พัฒนา และ นวัตกรรม, 2023. 1(1): p. 42-52.
50. วิทย์, ส.พ.ช.ญ.เ., et al., 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.
51. วรวิทย์, จ., ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้วัสดุมูลเบาเป็นตัวดูดซับ. 2015, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

52. Epp, J., X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization, in Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods. 2016, Elsevier. p. 81-124.
53. Zhang, Q., et al., Temperature varied biochar as a reinforcing filler for high-density polyethylene composites. Composites part b: engineering, 2019. 175: p. 107151.
54. Movasaghi, Z., S. Rehman, and D.I. ur Rehman, Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues. Applied Spectroscopy Reviews, 2008. 43(2): p. 134-179.
55. Pandey, K., A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. Journal of applied polymer science, 1999. 71(12): p. 1969-1975.
56. Li, G., et al., Rapid determination of biomass and polypropylene in three types of wood plastic composites (WPCs) using FTIR spectroscopy and partial least squares regression (PLSR). Holzforschung, 2015. 69(4): p. 399-404.
57. Pongchan, T., Effect of cocatalyst combination in titanium-based ziegler-natta catalyst on olefin polymerization. 2020.
58. Adeniyi, A.G., et al., Thermochemical co-conversion of sugarcane bagasse-LDPE hybrid waste into biochar. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021. 46: p. 6391-6397.
59. Liao, H.-K., et al., Study on pH_{pzc} and surface potential of tin oxide gate ISFET. Materials chemistry and physics, 1999. 59(1): p. 6-11.
60. Zand, A.D. and M.R. Abyaneh, Adsorption of Lead, manganese, and copper onto biochar in landfill leachate: implication of non-linear regression analysis. Sustainable Environment Research, 2020. 30: p. 1-16.
61. Zhao, B., et al., The hierarchical porous structure bio-char assessments produced by co-pyrolysis of municipal sewage sludge and hazelnut shell and Cu (II) adsorption kinetics. Environmental Science and Pollution Research, 2018. 25: p. 19423-19435.

62. Keerthanan, S., et al., Retention of sulfamethoxazole by cinnamon wood biochar and its efficacy of reducing bioavailability and plant uptake in soil. *Chemosphere*, 2022. 297: p. 134073.
63. Reguyal, F., Magnetic pine sawdust biochar: Synthesis, characterisation and mechanistic studies of the removal of sulfamethoxazole in aqueous media. 2017, ResearchSpace@ Auckland.
64. Saha, P. and S. Chowdhury, Insight into adsorption thermodynamics. *Thermodynamics*, 2011. 16: p. 349-364.
65. Bergmann, C.P. and F.M. Machado, Carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications. 2015: Springer.
66. Tran, H.N., S.-J. You, and H.-P. Chao, Thermodynamic parameters of cadmium adsorption onto orange peel calculated from various methods: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016. 4(3): p. 2671-2682.
67. Tran, H.N., et al., Thermodynamic parameters of liquid-phase adsorption process calculated from different equilibrium constants related to adsorption isotherms: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021. 9(6): p. 106674.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายประเมษฐ์ อังธิพันธ์
วันเกิด	วันที่ 9 กันยายน 2542
สถานที่เกิด	ตำบลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	144 ถนนเมืองใหม่ ตำบลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร รหัสไปรษณีย์ 49000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนมุกดาหาร ตำบลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร พ.ศ. 2560 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนมุกดาหาร ตำบลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภัโต ชีเว