



การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดูกวัวและหมูที่เตรียมด้วยกระบวนการ
แยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

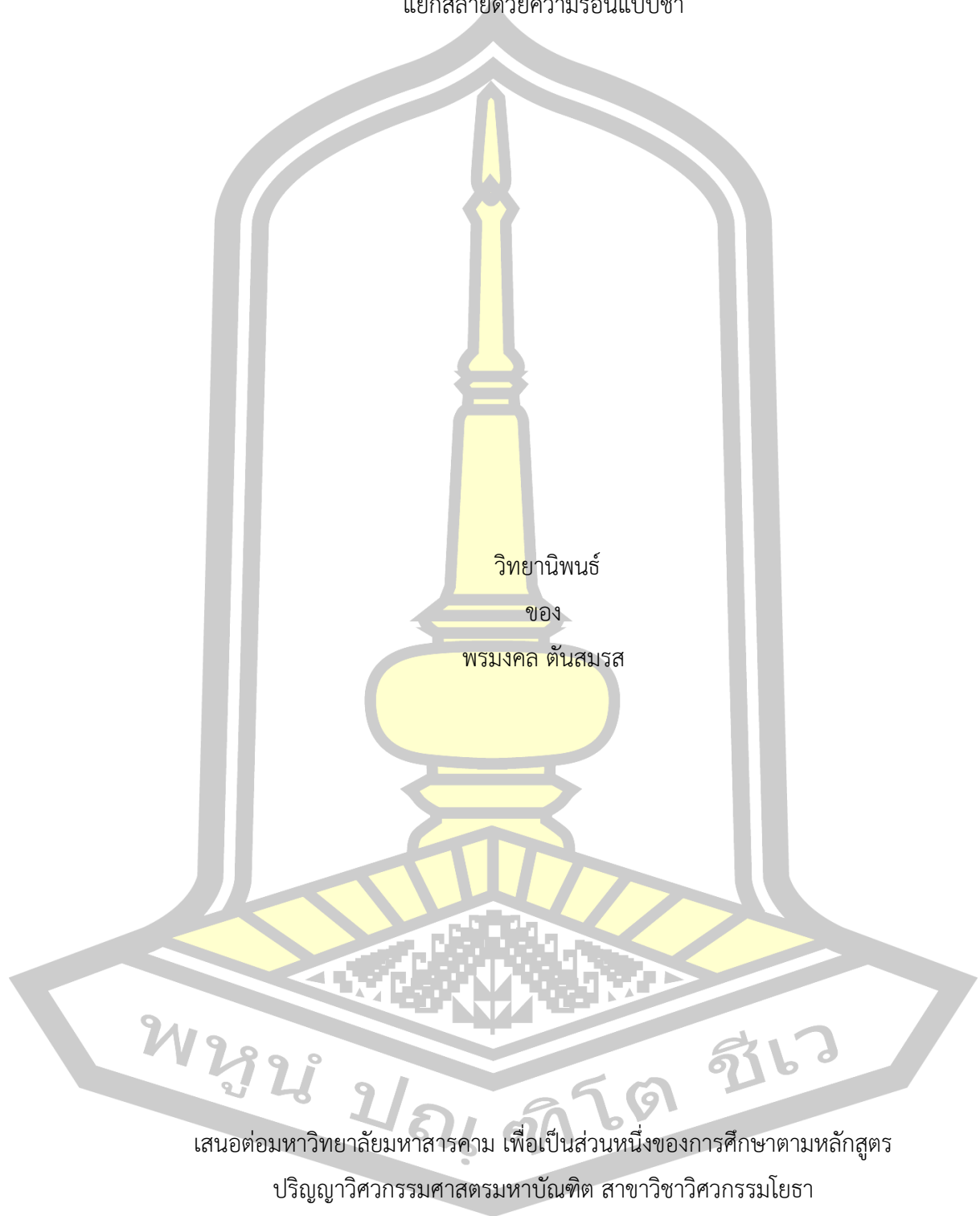
วิทยานิพนธ์
ของ
พรมงคล ต้นสมรส

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การจัดทอองแแต่งในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดูกวัวและหมูที่เตรียมด้วยกระบวนการ
แยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า



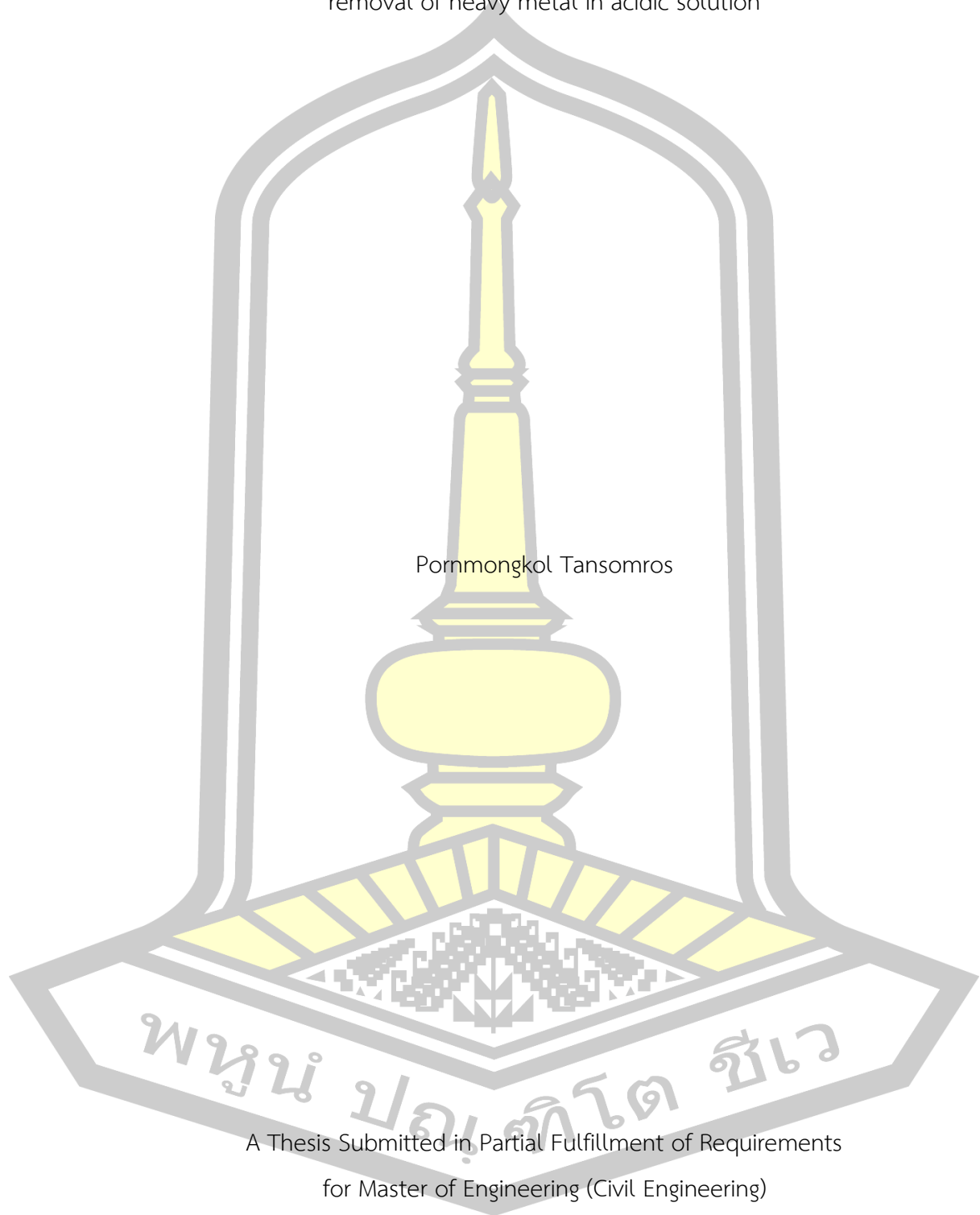
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Slow pyrolysis of waste pig and cow bone for production of biochar and its use for
removal of heavy metal in acidic solution

Pornmongkol Tansomros



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

June 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวพรมงคล ต้นสมรส
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. สุรัชย์ วงซารี่)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. เพ็ชร เพ็งชัย)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดูกวัวและหมูที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

ผู้วิจัย พรหมงคล ตันสมรส

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัชชัย วงชารี

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่นำกระดูกเหลือทิ้งจากกระดูกวัวและหมูมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการนำมาเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับและศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง SEM-EDX FTIR XRD BET และ CHNS พบว่า ถ่านไบโอชาร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นคาร์บอนอสัณฐานโดยชัดเจนไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างผลึก หรือกลุ่มฟังก์ชัน รวมไปถึงประมาณคาร์บอนภายในถ่านไบโอชาร์ และจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับพบว่าถ่านไบโอชาร์วัวสามารถดูดซับน้ำเสียทองแดงได้ดีกว่าถ่านไบโอชาร์หมูคิดเป็น 6.29 เปอร์เซ็นต์ มีค่า pH_{PZC} อยู่ระหว่าง 6-7 จากการวิเคราะห์ไอโซเทอมและจลนพลศาสตร์การดูดซับมีลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพ มีการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น อีกทั้งอุณหภูมิยังมีผลต่อการทดลองการดูดซับอีกด้วยเมื่อใช้อุณหภูมิในการดูดซับที่สูงขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะรวดเร็วมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้สามารถลดปริมาณทองแดงในน้ำเสียได้จริง อีกทั้งสามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกสำหรับการบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังปล่อยสู่แหล่งน้ำ

คำสำคัญ : กระดูกวัว, กระดูกหมู, ถ่านไบโอชาร์วัว, ถ่านไบโอชาร์หมู, ไพโรไลซิสแบบช้า

พจนัน ปณฺ ทิโต ชีเว

TITLE Slow pyrolysis of waste pig and cow bone for production of biochar and its use for removal of heavy metal in acidic solution

AUTHOR Pornmongkol Tansomros

ADVISORS Assistant Professor Surachai Wongcharee , Ph.D.

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2024

ABSTRACT

This research investigates the utilization of discarded bones from cows and pigs to derive maximum benefits. The bones are subjected to slow pyrolysis at temperatures of 300, 400, and 500°C for one hour. Subsequently, the ability to adsorb and study the structural characteristics of the resulting biochar is examined. Through advanced analytical techniques such as SEM-EDX, FTIR, XRD, BET, and CHNS, it is found that both types of biochar exhibit distinct carbonaceous characteristics, including porous structures and functional groups. Additionally, it is discovered that cow bone biochar demonstrates better adsorption capacity for copper ions compared to pig bone biochar, with an efficiency of 6.29%. The pH at the point of zero charge (pH_{PZC}) falls between 6-7. Analysis of isotherms and adsorption kinetics reveals that the adsorption process is predominantly physical and multilayered. Moreover, temperature significantly influences the adsorption process, with higher temperatures leading to faster adsorption rates. This research demonstrates the potential to reduce copper content in wastewater and suggests the application of biochar as an alternative for water treatment both pre- and post-release into water sources.

Keyword : Cow Bone, Pig Bone, Bone Char, Biochar, Slow pyrolysis

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์เรื่องการกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านไบโอชาร์จาก กระตู่แก้วและหมูที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านไ้เห็นกรุณาช่วยเหลือให้ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และ กำลังใจแก่ผู้จัดทำ

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

ขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ที่ใช้ในการทดลอง เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำชิ้นงานการค้นคว้าและวิจัย ตลอดจนการทำให้รูปเล่มปริญญานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ พี่น้องและเพื่อน ๆ ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัย ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

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

พรมงคล ตันสมรส

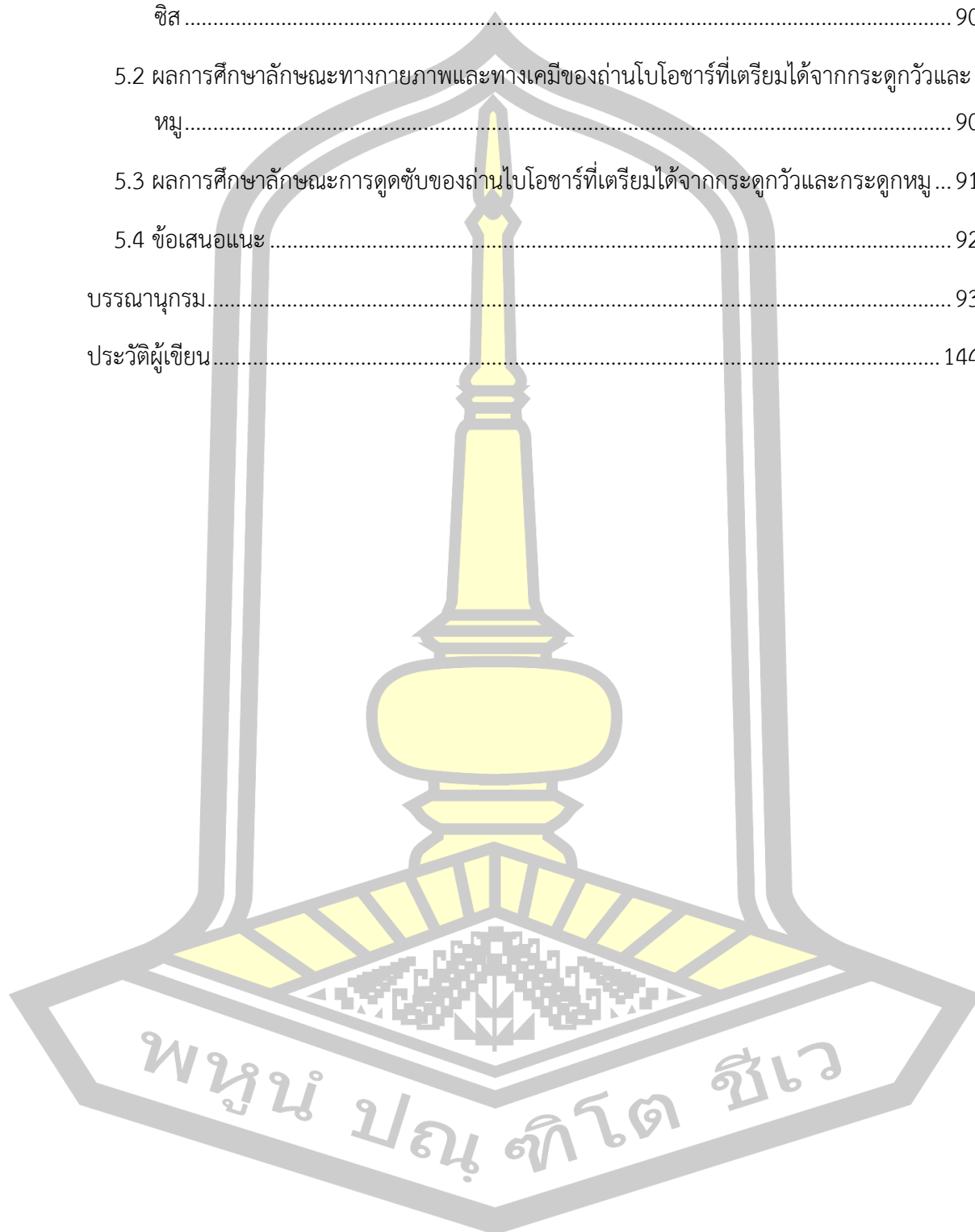
พูน ปณ จิต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
1.7 สถานที่ทำวิจัย	4
1.8 ขอบประมาณในการดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2	5
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วัวและหมู	5
2.2 ประโยชน์ของกระดูก	9
2.3 ถ่านชาร์	12

2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Process)	16
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)	20
2.6 จลพลศาสตร์ของการดูดซับ	30
2.7 ทองแดง	34
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
บทที่ 3	40
วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
3.1 สถานที่ทำการวิจัย	40
3.2 การเตรียมถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)	40
3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar)	43
3.4 ความสามารถในการดูดซับ	47
3.5 วิธีการทดลอง	48
3.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ	49
3.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)	49
3.8 เทอร์โมไดนามิคการดูดซับ (Thermodynamic)	50
บทที่ 4	52
อภิปรายผลการทดลองงานวิจัย	52
4.1 ลักษณะทางกายภาพของกระดูกวัวและหมูก่อนและหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	52
4.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู	53
4.3 ลักษณะการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมู	67
บทที่ 5	90
สรุปอภิปรายผลการทดลอง	90

5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระดุกวัวและหมูก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฟโรไลซิส	90
5.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัวและหมู.....	90
5.3 ผลการศึกษาลักษณะการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัวและกระดุกหมู ...	91
5.4 ข้อเสนอแนะ	92
บรรณานุกรม.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	144



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	15
ตารางที่ 3 ความต้องการทองแดงของร่างกาย	36
ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมู	65
ตารางที่ 5 แสดงค่าองค์ประกอบของธาตุ CHNS ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	66
ตารางที่ 6 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว	76
ตารางที่ 7 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู	79
ตารางที่ 8 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว	83
ตารางที่ 9 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู	86
ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู	88

พูน ปณ จิต ชีเว

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 วัว.....	6
ภาพประกอบ 2 วัว.....	7
ภาพประกอบ 3 กระดุกวัวและหมู.....	10
ภาพประกอบ 4 ภาพถ่านชาร์ที่ทำจากขี้เลื่อยและกระดุกไก่.....	13
ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านไบโอชาร์.....	14
ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการผลิตถ่านชาร์ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar).....	15
ภาพประกอบ 7 ภาพแสดงการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ	20
ภาพประกอบ 8 การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	21
ภาพประกอบ 9 กลไกการดูดซับ	22
ภาพประกอบ 10 ไอโซเทอม Type I Isotherm	28
ภาพประกอบ 11 ไอโซเทอม Type II Isotherm	28
ภาพประกอบ 12 ไอโซเทอม Type III Isotherm.....	29
ภาพประกอบ 13 ไอโซเทอม Type IV Isotherm.....	29
ภาพประกอบ 14 ไอโซเทอม Type V Isotherm.....	30
ภาพประกอบ 15 ทองแดง	35
ภาพประกอบ 16 ภาพกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัวและหมู.....	42
ภาพประกอบ 17 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process).....	42
ภาพประกอบ 18 กระดุกวัวและหมูที่ตากแห้งแล้ว (ก่อนนำไปเผา).....	43
ภาพประกอบ 19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX).....	44
ภาพประกอบ 20 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)	45

ภาพประกอบ 21 เครื่องฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	46
ภาพประกอบ 22 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET).....	47
ภาพประกอบ 23 ภาพถ่ายวัตถุติด 53	53
ภาพประกอบ 24 SEM สำหรับถ่านไบโอชาร์	55
ภาพประกอบ 25 SEM สำหรับถ่านไบโอชาร์	56
ภาพประกอบ 26 แสดงองค์ประกอบของธาตุของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยเทคนิค EDX.....	57
ภาพประกอบ 27 ภาพลักษณะ XRD ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C	59
ภาพประกอบ 28 ภาพลักษณะ XRD ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C	59
ภาพประกอบ 29 ลักษณะ FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว.....	61
ภาพประกอบ 30 ลักษณะ FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู.....	61
ภาพประกอบ 31 ไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์วัวจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	63
ภาพประกอบ 32 ไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์หมูจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	64
ภาพประกอบ 33 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู ...	67
ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงผล Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว	68
ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงผล Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู	69
ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับทองแดง	70
ภาพประกอบ 37 ภาพแสดงปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู	72
ภาพประกอบ 38 ภาพแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	73

ภาพประกอบ 39 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุก วัว.....	75
ภาพประกอบ 40 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก กระดุกหมู	79
ภาพประกอบ 41 ภาพแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุก วัว.....	82
ภาพประกอบ 42 ภาพแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก กระดุกหมู	86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโรงฆ่าสัตว์ที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการฆ่าสัตว์ในจังหวัดมหาสารคามมีทั้งหมด 21 แห่ง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ โรงฆ่าสัตว์ชนิดสัตว์ปีก, ชนิดโค-กระบือ และชนิดสุกร ชนิดสัตว์ปีกแบ่งออกเป็น 4 แห่ง ชนิดโค-กระบือ 8 แห่ง และชนิดสุกร 9 แห่ง ซึ่งแต่ละแห่งจะกระจายกันอยู่ตามอำเภอต่างๆ จังหวัดมหาสารคาม (1) ปัจจัยในการฆ่าสัตว์คือฆ่าเพื่อนำมาทำธุรกิจ ค้า-ขาย ฆ่าเพื่อนำมาประกอบอาหาร ซึ่งปัจจัยหลักคือการนำมาประกอบอาหารเนื่องจากทุกครัวเรือนจำเป็นต้องใช้เนื้อสัตว์ในการประกอบอาหาร จึงทำให้เกิดข้อสงสัยว่าส่วนที่เหลือทิ้ง เช่น กระดูก จะมีวิธีการจัดการอย่างไร

การจัดการกระดูกมีกระดูกเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก จะมีเพียงบางส่วนที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่คือ การนำมาทำเป็นน้ำซุบน้ำสต็อกไว้สำหรับปรุงอาหาร, นำมาบดเพื่อนำไปทำผงชูรส, นำไปบดเพื่อทำปุ๋ยดิน, สามารถนำมาเป็นเครื่องประดับ (2), การนำมาทำถ่านกระดูกเพื่อใช้สำหรับการดูดสี ดูดกลิ่น (2) และนอกจากนี้ถ้ากระดูกยังสามารถนำมาเป็นปุ๋ยดินหรือใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาได้อีกด้วย มากไปกว่านั้น ประโยชน์ของถ่านชาร์สามารถนำมาปรับปรุงดินเพื่อปลูกพืช, นำมาดูดซับแก๊สและลดกลิ่น, นำมาดูดซับแร่ธาตุที่ปนเปื้อนไปในแหล่งน้ำ และนำมาดูดซับสารเคมีและโลหะหนัก เป็นต้น แต่กระนั้นก็ไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายหรือกำจัดกระดูกเหลือทิ้งนี้ให้หมดไป จึงเล็งเห็นความสำคัญของกระดูกเหลือทิ้งนี้ โดยการนำมาทำถ่านชาร์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักทองแดง

ถ่านชาร์ ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) เป็นชื่อเรียกถ่านที่ผลิตจากวัตถุดิบทางชีวมวล ถ่านชีวภาพสามารถผลิตโดยการเปลี่ยนองค์ประกอบของมวลชีวภาพให้สลายตัวด้วยความร้อนและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบของคาร์บอนที่คงตัวผ่านกระบวนการให้ความร้อนในสถานที่จำกัดแบบอัดออกซิเจน โดยส่วนใหญ่จะใช้วัตถุดิบเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร เช่น เปลือกไม้ เศษไม้ มูลสัตว์ ชั้ต้นข้าวโพด และกระดูกสัตว์ เป็นต้น (3) ซึ่งจะนำมาเผาที่อุณหภูมิเฉลี่ย 300-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านชาร์ที่ทำจากกระดูก เคยใช้ในสหรัฐอเมริกาและปัจจุบันใช้ในประเทศกำลังพัฒนาหลายแห่ง (รวมถึงไทย ศรีลังกา และบางประเทศในแอฟริกา) เพื่อกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำ ถ่านชาร์ที่ได้จากกระดูกจะถูกเผาเพื่อกำจัด สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (Organic matter) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมฟอสเฟต อย่างไรก็ตามมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านชาร์กระดูกในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดิบ ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ (1) วิธีการ

เตรียมและคุณภาพของถ่านชาร์; ผลการวิจัยพบว่าการใช้ถ่านกระดูกเกรดต่ำจะเพิ่มรสชาติและกลิ่นที่ไม่ดีให้กับน้ำที่ผ่านการบำบัด (2) การมีไอออนรบกวนอื่นๆ โดยเฉพาะไอออนของสารหนูในน้ำดิบทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และ (3) ปริมาณกรดที่เติมเพื่อให้เบสส่วนเกินเป็นกลางซึ่งใช้ในขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์จากกระดูก นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดบำบัดขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านที่ใช้ อุณหภูมิ ค่า pH ของน้ำเสีย เวลาสัมผัส และความเข้มข้นของสารของโลหะหนักที่ต้องการบำบัด เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการดูดซับของถ่านชาร์กระดูก การสังเคราะห์กระดูกที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ต่างกัน การปรับพื้นผิวของถ่านชาร์บอนด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตช่วยเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับมากถึง 600% เมื่อเทียบกับถ่านชาร์ที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

ประโยชน์ของถ่านกระดูกสามารถนำมาใช้ดูดซับน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ได้ สามารถดูดสีดูดกลิ่น (2) และยังสามารถดูดซับฟลูออไรด์จากน้ำดื่ม (4) ได้อีกด้วย ทั้งนี้ประโยชน์ของถ่านกระดูกยังสามารถดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียเช่น ทองแดง, ฟลูออไรด์และสารหนู เป็นต้น

แหล่งน้ำเสียโลหะหนักหลักมาจาก โรงงานอุตสาหกรรม, น้ำเสียคั้นน้ำ, การฝังกลบ, จากภาคการเกษตร (5) เมื่อมีแหล่งน้ำเสียก็จำเป็นต้องมีการบำบัด การบำบัดน้ำเสียโลหะหนักมีหลากหลายวิธี เช่น ion Exchange Resin (6), การดูดซับ(7), การใช้เมมเบรน(8), Electrostatic (9) และ Nanofiltration(10) ซึ่งวิธีส่วนใหญ่มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง การดูดซับจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำเอาของเหลือทิ้งมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อศึกษา

สำหรับงานวิจัยนี้เน้นศึกษาการนำเอากระดูกวัวและหมู เหลือทิ้งมาทำเป็นถ่านชาร์ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของถ่านชาร์ที่ผลิตได้ อีกทั้งทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงสังเคราะห์ในสารละลายกรด รวมไปถึงศึกษากลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอม และ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ อีกทั้งเทอร์โมไดนามิคของการดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เตรียมถ่านชาร์โดยใช้กระดูกวัวและหมู โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.2.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของถ่านชาร์ที่เตรียมได้ และเปรียบเทียบถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู

1.2.3 ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงสังเคราะห์เตรียมได้จากสารละลายกรด

1.2.4 ศึกษากลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอม จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และเทอร์โมไดนามิคของการดูดซับ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ที่ทำมาจากกระดูกวัวและหมู โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง น่าจะมีคุณภาพดีกว่า การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่านี้

1.3.2 สามารถใช้ถ่านชาร์จากกระดูกวัวและหมู นำมาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงในสารละลายกรดได้ เช่นทองแดงจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 กระดูกวัวและหมูทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียสใช้เวลา 1 ชั่วโมง

1.4.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายใน โดยใช้เครื่องมือขั้นสูงคือ SEM-EDX, XRD, BET, และ FTIR ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายสังเคราะห์ทองแดงที่เตรียมได้จากสารละลายกรด

1.4.3 น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเตรียมในสารละลายกรดที่มีค่า pH ไม่เกิน 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถนำกระดูกวัวและหมูที่เหลือทิ้งจากการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านชาร์เพื่อเพิ่มมูลค่า

1.5.2 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกระดูกวัวและหมูได้

1.5.3 สามารถนำถ่านชาร์กระดูกที่เตรียมได้จากวัวและหมูมาบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้ โดยเฉพาะโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2565			2566		
	ภ.1	ภ.2	ภ.3	ภ.1	ภ.2	ภ.3
1. ศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวข้องกับหัวข้องานวิจัย	←					→
2. เริ่มปฏิบัติการทดลอง		←			→	
3. เตรียมถ่านไปโอชาร์		←		→		
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างทาง			←		→	

กายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์						
5. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดง				←→		
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง				←→		→
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์					←→	→
8. จัดทำเอกสารตีพิมพ์					←→	→

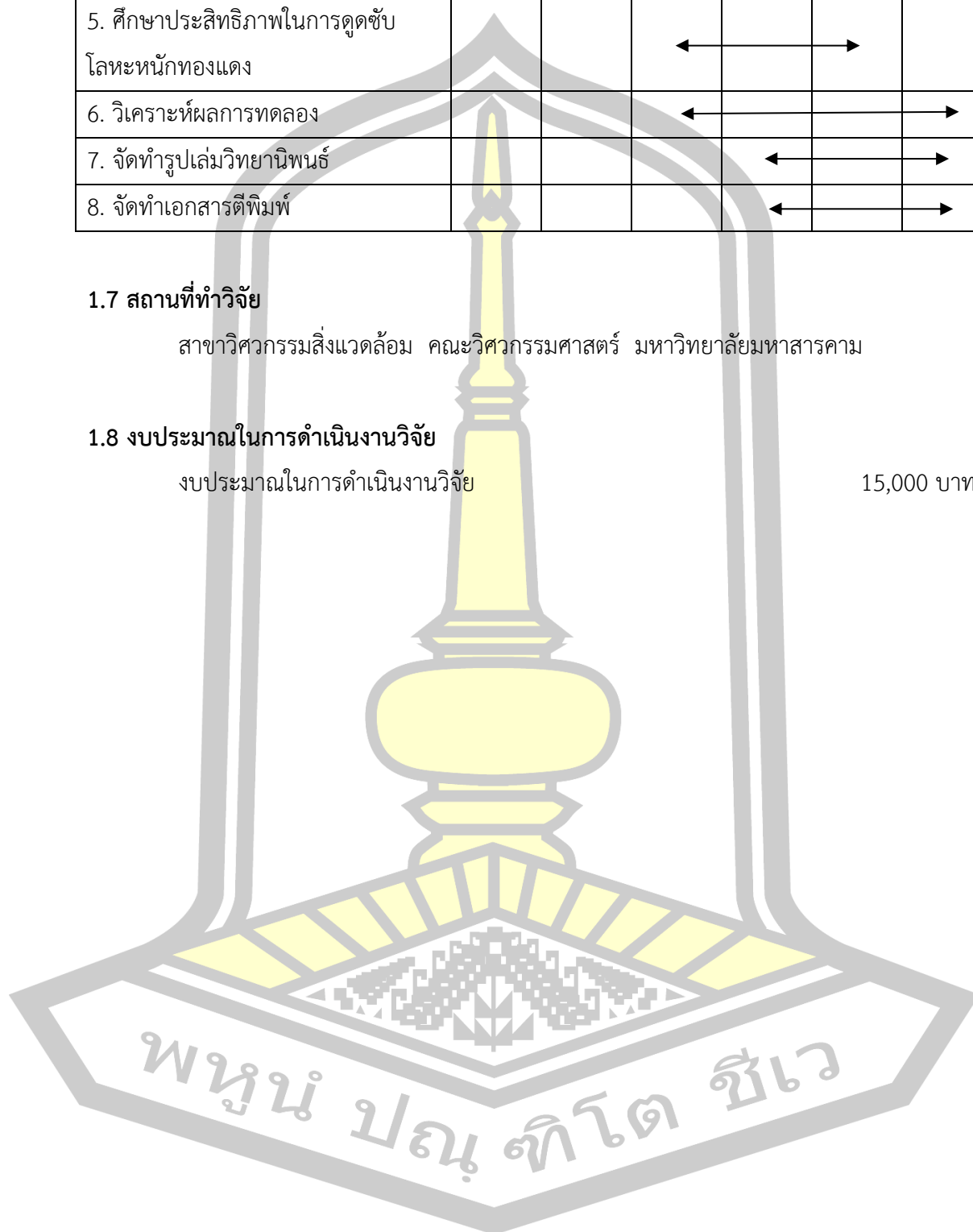
1.7 สถานที่ทำวิจัย

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.8 งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

15,000 บาท



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัวและหมู

2.1.1 วัว

วัว หรือ โค เป็นสัตว์มีกีบเท้าที่เป็นสัตว์เลี้ยงขนาดใหญ่และเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เป็นสมาชิกสมัยใหม่ที่โดดเด่นในวงศ์ย่อย Bovinae เป็นชนิดที่แพร่หลายที่สุดในสกุล Bos และถูกจำแนกเป็นกลุ่มอย่างกว้างขวางที่สุดว่า Bos primigenius วัวถูกเลี้ยงเป็นปศุสัตว์เพื่อเอาเนื้อ เพื่อเอานมและผลิตภัณฑ์นมอื่น ๆ และเป็นสัตว์ลากเทียม ผลิตภัณฑ์อื่นจากวัวมีหนังและมูลเพื่อใช้เป็นปุ๋ยคอกหรือเชื้อเพลิง ในบางประเทศ เช่น อินเดีย วัวเป็นสัตว์ศักดิ์สิทธิ์ จากบรรพบุรุษวัวที่เป็นสัตว์เลี้ยงเพียง 80 ตัว ในอานาโตเลียตอนกลาง, ลิแวนต์ และอิหร่านตะวันตกเมื่อราว 10,500 ปีก่อน (11) องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติรายงานว่าวัวบนโลกประมาณ 1.5 พันล้านตัวใน ค.ศ. 2018 (12) วัวเป็นแหล่งต้นกำเนิดหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปศุสัตว์ และมีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกประมาณ 10% (13, 14) ใน ค.ศ. 2009 วัวเป็นปศุสัตว์ชนิดแรกที่มีการทำแผนที่จีโนมอย่างสมบูรณ์ (15)

วัวเนื้อในประเทศไทยนั้นหากจะย้อนดูถึงประวัติความเป็นมาก็คงแบ่งได้เป็นประวัติของวัวเนื้อพันธุ์พื้นเมือง วัวเนื้อจากต่างประเทศ รวมถึงวัวเนื้อพันธุ์ผสม สำหรับวัวเนื้อพันธุ์พื้นเมืองของไทย เป็นวัวที่มีสายพันธุ์ลักษณะใกล้เคียงกับวัวเนื้อของประเทศบ้านในแถบอาเซียน ของเรา มีความเป็นมายาวนานตั้งแต่สมัยที่เมืองไทยยังไม่เป็นราชอาณาจักรไทยในปัจจุบัน วัวเนื้อไทยแต่เดิมไม่ได้ถูกเลี้ยงไว้สำหรับบริโภค คนไทยนิยมเลี้ยงวัวไว้สำหรับใช้งาน เทียมเกวียน ทุนแรง ใช้เป็นพาหนะสัญจรมากกว่า แต่ไม่พบประวัติว่าคนไทยเริ่มรับประทานเนื้อวัวในสมัยใด (16)

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 1 วัว

ที่มา : แหล่งชุมชน

โคเนื้อพันธุ์ต่างประเทศ โคเนื้อพันธุ์ผสม มีความเป็นมาในหลายร้อยปีมาแล้ว วัวจากประเทศอินเดียในหลายสายพันธุ์ได้ถูกนำเข้ามาในดินแดนที่เป็นประเทศไทยในปัจจุบัน จากการติดต่อค้าขายกับชาวต่างชาติซึ่งในสมัยนั้นไทยยังคงเป็นเพียงกลุ่มอารยธรรมลุ่มแม่น้ำในอาณาจักรต่าง ๆ วัวเนื่อนำเข้ามาด้วยความต้องการกินเนื้อวัวของชาวต่างชาติโดยเฉพาะชาวอินเดียมุสลิมที่ย้ายถิ่นฐานมาค้าขายในดินแดนนี้ เพราะแต่เดิมนั้นคนไทยไม่นิยมกินเนื้อสัตว์ใหญ่ คนไทยพื้นถิ่นแต่เดิมนิยมกินสัตว์เล็กโดยเฉพาะปลา วัวจากดินแดนชมพูทวีปหรืออินเดียจะมีลักษณะใหญ่ เนื้อแน่น น้ำหนักมากกว่าวัวไทยพื้นเมืองหลายเท่า พันธุ์ที่รู้จักกันดีได้แก่ บราห์มัน (16)

หลังจากนั้นในยุคปัจจุบัน ช่วงปี ก่อนพ.ศ.2500 นั้น รัฐบาลไทยและพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรัชกาลที่ 9 ได้ทรงส่งเสริมและทรงดำริให้นำวัวเนื่อจากต่างประเทศเข้ามาใช้เป็นพ่อพันธุ์มากมายหลากหลายสายพันธุ์ และยังนำมาผสมกับสายพันธุ์พื้นเมืองจนได้พันธุ์ใหม่ที่ทนทานสามารถเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศแบบเมืองร้อนชื้นของไทย โดยได้พัฒนาสายพันธุ์ต่างประเทศคือขนาดตัวใหญ่ เนื้อแน่นและให้เนื้อเยอะ แต่จะไม่ทนต่อสภาพภูมิอากาศแบบไทย ๆ ทำให้ไม่ทนเลี้ยงยาก เมื่อนำมาผสมเข้ากับวัวเนื่อสายพันธุ์พื้นเมืองของไทย ก็ได้รับลักษณะเด่นของวัวเนื่อไทย อยู่ง่ายเลี้ยงง่ายในสภาพภูมิอากาศและยังมีขนาดตัวใหญ่ น้ำหนักมากเนื้อแน่นแบบพันธุ์วัวเนื่อต่างประเทศด้วย (16)



ภาพประกอบ 2 วัว

ที่มา : แหล่งชุมชน

วัวเนื้อได้รับการพัฒนาและเสาะหาสายพันธุ์ที่เหมาะสมจะเลี้ยงในประเทศไทยตามท้องถิ่นต่าง ๆ ทั้งวัวเนื้อที่ถูกนำเข้ามาโดยยังคงมีสายพันธุ์แท้ดั้งเดิมของประเทศไทยนั้น ๆ ที่เป็นแหล่งกำเนิดและวัวเนื้อพันธุ์ผสมที่ถูกพัฒนาสายพันธุ์แล้ว วัวเนื้อพันธุ์ผสมและวัวเนื้อพันธุ์แท้ต่างประเทศที่มีคุณภาพและเป็นที่นิยมเลี้ยงได้แก่ วัวเนื้อพันธุ์ตาก วัวเนื้อพันธุ์กบินทร์บุรี วัวเนื้อพันธุ์กำแพงแสน วัวเนื้อพันธุ์แองกัส วัวเนื้อพันธุ์อเมริกันบราห์มัน วัวพันธุ์โคจิมะ เป็นต้น (16)

2.1.2 หมู

หมู หรือ สุกร การเลี้ยงหมูมีมาเป็นเวลานานหลายพันปี ประเทศจีนเป็นชาติแรกที่เริ่มเลี้ยงหมูต่อมาได้แก่ ประเทศอังกฤษ ในปัจจุบันการเลี้ยงหมูมีแพร่หลายทั่วโลก หลายประเทศในแถบเอเชีย ยุโรป และอเมริกา ได้ปรับปรุงการเลี้ยงหมูจนได้ผลดีสามารถนำผลิตผลจากหมูมาเป็นสินค้าส่งออก ไส้กรอก แฮม เบคอน และอาหารกระป๋องอื่น ๆ ที่ทำจากเนื้อหมูเป็นที่นิยมรับประทานกันทั่วไป เนื้อหมูอุดมด้วยโปรตีนและไขมันมีประโยชน์ต่อร่างกายมากใช้ประกอบอาหารได้หลายชนิดเราควรทำให้สุกด้วยการลวก ต้ม หรือทอดก็ได้เพื่อป้องกันพยาธิที่อาจมีอยู่ในเนื้อหมูดิบ (17)

หมูเป็นสัตว์สี่เท้าที่นิยมเลี้ยงกันมากเพราะเลี้ยงง่ายโตเร็วและให้ลูกเร็ว หมูมีสีขนและรูปร่างลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์หมูที่นิยมเลี้ยงแต่ดั้งเดิมเป็นหมูพันธุ์พื้นเมืองส่วนใหญ่มีรูปร่างอ้วน เตี้ย สะโพกเล็ก หลังแอ่น และท้องยานลากดิน ลำตัวมีสีขาวและสีดำปนกัน หมูพันธุ์พื้นเมืองบางชนิดมีหนังหยาบและย่นเมื่อโตเต็มที่ชาวบ้านทั่วไปนิยมเลี้ยงหมูไว้ได้ขุนบ้านหรือในบริเวณใกล้เคียง ปล่อยให้หมูอยู่บนลานดินหรือลานซีเมนต์มีบางบ้านเท่านั้นที่สร้างคอกให้หมูอยู่ การ

เลี้ยงเป็นแบบง่าย ๆ โดยเอาเศษอาหารต่าง ๆ ที่เหลือจากคนมารวมผสมให้หมูกิน หมูกินจุและกินอาหารไม่เลือกชนิดนอกจากนั้นผู้เลี้ยงยังใช้ผักที่หาได้ทั่วไป เช่น ผัก บั้ว ผักตบชวา จอก แหน หรือหยวกกล้วยสับละเอียดผสมกับรำข้าวและน้ำเป็นอาหารให้หมูกิน เมื่อหมูโตจะนำไปขายฆ่าเพื่อเอาเนื้อเป็นอาหารหรือนำหมูตัวผู้และหมูตัวเมียมาผสมพันธุ์เพื่อให้มีลูกหมูมาเลี้ยงต่อไป (17)

ในปัจจุบันการเลี้ยงหมูก้าวหน้าไปจากเดิมมากมีการสั่งซื้อพันธุ์ต่างประเทศเข้ามาหลายพันธุ์ เช่น หมูพันธุ์แลนด์เรซที่มีถิ่นกำเนิดจากประเทศเดนมาร์กและหมูพันธุ์ลาร์จไวต์ที่มีถิ่นกำเนิดจากประเทศอังกฤษ เป็นต้น หมูพันธุ์ที่สั่งเข้ามาจากต่างประเทศได้รับความนิยมมากกว่าหมูพันธุ์พื้นเมืองเพราะมีรูปร่างลักษณะดีสามารถเพิ่มน้ำหนักได้เร็วกว่าหมูพันธุ์พื้นเมือง เนื้อมีไขมันน้อยขายได้ราคาดี วิธีการเลี้ยงและการผสมพันธุ์ได้รับการปรับปรุงขึ้นมาก มีการสร้างคอกและโรงเรือนให้หมูอยู่ โรงเรือนบางแห่งสร้างอยู่บนดินเทพื้นด้วยซีเมนต์โดยเทให้ลาดต่ำออกไปทางด้านหลังเพื่อสะดวกในการทำความสะดวกกวาดเก็บขี้หมู บางแห่งยกพื้นสูงช่วยให้อากาศถ่ายเทได้ดีเพื่อให้หมูสมบูรณ์แข็งแรงผู้เลี้ยงให้อาหารผสมที่มีคุณค่าและจัดให้หมูได้ฉีดยาวัคซีนตามกำหนดการคัดเลือกพันธุ์หมูที่ดีมาผสมทำให้ลูกหมูมีโอกาสรอดตายสูง การเลี้ยงหมูทุกวันนี้จึงเปลี่ยนจากการเลี้ยงแบบหลังบ้าน บ้านละ 2-3 ตัว มาเป็นการเลี้ยงหมูจำนวนมากเพื่อการค้า (17)

หมูมีถิ่นกำเนิดเดิมมาจากหมูป่าในแถบยุโรป อเมริกา แอฟริกา และเอเชีย ชาวจีน และชาวไทยนิยมเลี้ยงหมูกันมาก ผู้เลี้ยงหมูในสมัยก่อนมีวิธีเลี้ยงแบบง่าย ๆ นอกจากเศษอาหารในครัวเรือน รำข้าวและหยวกกล้วยสับละเอียดยังนำเอาผักหญ้าต่าง ๆ ที่หาได้ในท้องถิ่นมาสับให้ละเอียดผสมกับรำข้าว กากถั่วเหลืองหรือกากถั่วลิสงและน้ำให้หมูกิน หมูที่ชาวบ้านเลี้ยงในสมัยดั้งเดิมเป็นหมูพันธุ์พื้นเมือง ตัวเล็ก เติบโตช้า ใช้เวลานานในการขุนให้อ้วน ให้ซากที่มีเนื้อน้อยมันมาก หมูพันธุ์พื้นเมืองที่เลี้ยงกันทั่วไป ได้แก่ หมูพันธุ์ควาย หมูพันธุ์ราด หมูพันธุ์พวง และหมูพันธุ์โหล่า ที่มีถิ่นเดิมมาจากประเทศจีน (17)

ในปัจจุบันการเลี้ยงหมูได้พัฒนาขึ้นมากทั้งการเลี้ยงดู การให้อาหารและการปรับปรุงพันธุ์มีการสร้างโรงเรือนเลี้ยงหมู บ้านเมืองเรามีอากาศร้อนโรงเรือนสำหรับหมูควรโปร่งมีหลังคาสูงเพื่อให้อากาศระบายได้ดีตลอดเวลา ภายในโรงเรือนอาจแบ่งเป็นคอกมีห้องเก็บอาหารและเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ อาหารสำหรับหมูได้รับการปรับปรุงให้มีคุณภาพสูงเป็นอาหารผสมที่มีประโยชน์มีสารอาหารครบ 5 หมู่ ได้แก่ น้ำ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และแร่ธาตุ พันธุ์ของหมูเปลี่ยนไปตามความต้องการของผู้เลี้ยงและผู้บริโภค ลักษณะของอาหารที่หมูกิน และตามความประสงค์ของผู้ผสมพันธุ์ การนำหมูพันธุ์ดีหลายพันธุ์จากต่างประเทศมาผสมพันธุ์ทำให้เกิดหมูพันธุ์ใหม่ ๆ ขึ้น หมูพันธุ์ต่างประเทศที่นิยมเลี้ยงกันมากและได้ผลดีมีหลายพันธุ์ เช่น พันธุ์แลนด์เรซ พันธุ์ลาร์จไวต์ พันธุ์ดู ร็อกและพันธุ์ลูกผสมต่าง ๆ หมูพันธุ์ต่างประเทศได้รับความนิยมมากกว่าหมูพันธุ์พื้นเมืองเพราะเติบโตเร็วมีคุณภาพของซากดี (คุณภาพของซากที่ดี คือ ต้องมีเนื้อแดงมาก ไขมันน้อย ทำ

ให้ขายได้ราคาสูง) สามารถเปลี่ยนอาหารที่กินเข้าไปให้เป็นเนื้อได้มากจึงขุนให้อ้วนได้ง่าย หมูอายุ 5-6 เดือน เมื่อได้อาหารเต็มที่จะมีน้ำหนักราว 90-100 กิโลกรัมก็ขายส่งตลาดได้ คุณภาพซากมีเนื้อแดงมาก ไขมันบาง หมูหนุ่มหมูสาวที่สมบูรณ์ก็อาจคัดไว้สำหรับผสมพันธุ์เพื่อเอาลูกเลี้ยงต่อไป (17)

พ่อหมูและแม่หมูที่นำมาใช้ทำพันธุ์ควรมีลักษณะดีไม่เคยเป็นโรคติดต่อย่างรุนแรงมาก่อน ห้ามนำหมูป่วยหรือหมูที่เพิ่งได้รับการฉีดวัคซีนมาผสมพันธุ์ โดยปกติพ่อหมูที่ใช้ผสมพันธุ์ควรมีอายุประมาณ 8 เดือน น้ำหนักประมาณ 80-90 กิโลกรัม สำหรับพ่อหมูพันธุ์ต่างประเทศควรหนักประมาณ 115 กิโลกรัม แม่หมูอายุประมาณ 7-8 เดือน ต้องมีโครงสร้างร่างกายแข็งแรงมีเต้านมที่สมบูรณ์อย่างน้อย 12 เต้า แม่หมูอาจให้ลูกได้ถึง 5 ครอกในระยะเวลา 2 ปี และแต่ละครอกประมาณ 8-12 ตัว ในชีวิตของแม่หมูตัวหนึ่งสามารถมีลูกได้ 8-10 ครอก และให้ลูกได้ถึง 70-80 ตัว ลูกหมูจะอยู่ในท้องแม่ประมาณ 114 วัน (3 เดือน 3 สัปดาห์ 3 วัน) จะเร็วหรือช้ากว่านี้ประมาณไม่เกิน 3 วัน (17) ลูกที่เกิดจากพ่อแม่ที่สมบูรณ์จะมีโอกาสรอดชีวิตได้มาก การผสมพันธุ์ควรทำในตอนเช้าหรือเย็นขณะที่อากาศไม่ร้อนอบอ้าว แม่หมูในระหว่างผสมพันธุ์อึดท้องและคลอดลูกต้องได้รับการดูแลอย่างถูกวิธีได้ อาหารอย่างเพียงพอควรแยกคอกให้อยู่คอกที่จะออกลูกต้องสะอาดอาจปูด้วยฟางข้าวหรือหญ้า เพื่อพื้นคอกจะได้ไม่แข็งกระด้างทั้งยังช่วยให้ความอบอุ่นแก่ลูกหมูที่เกิดใหม่ด้วย ลูกหมูหลังคลอดควรได้กินนมแม่ระยะเวลาที่สมควรหย่านม คือ เมื่อลูกหมูมีอายุราว 4 สัปดาห์หรือเมื่อมีน้ำหนักมากกว่า 5 กิโลกรัมขึ้นไป การให้ลูกหมูหย่านมเมื่อถึงเวลาสมควรเป็นการช่วยไม่ให้แม่หมูมีร่างกายทรุดโทรมมาก สามารถผสมพันธุ์ใหม่ได้ เมื่อลูกหมูโตควรได้รับการฉีดวัคซีนตามกำหนดเป็นระยะไป เพื่อป้องกันโรคต่าง ๆ ที่เกิดกับหมูดังนี้ (17)

- 6-7 สัปดาห์ ฉีดวัคซีนป้องกันโรคอหิวาต์หมู
- 8-9 สัปดาห์ ฉีดวัคซีนป้องกันโรคปากและเท้าเปื่อย

สำหรับหมูที่ใช้เป็นพ่อและแม่พันธุ์ซึ่งเป็นหมูที่มีชีวิตอยู่หลายปีจะฉีดวัคซีนป้องกันโรคอหิวาต์หมูปีละครั้งและฉีดวัคซีนป้องกันโรคปากและเท้าเปื่อยปีละ 2 ครั้ง (6 เดือนฉีด 1 ครั้ง) ผู้ทำฟาร์มเลี้ยงหมูเมื่อมีลูกหมูจำนวนมากสามารถคัดหมูตัวผู้และตัวเมียที่มีรูปร่างและคุณลักษณะดีไว้ส่วนหนึ่งเพื่อนำมาเป็นพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ต่อไป ส่วนที่เหลืออาจจะแบ่งขายเมื่อลูกหมูหย่านมหรือจะขุนไว้ขายเองก็ได้ ในประเทศไทยมีการเลี้ยงหมูอยู่ทั่วทุกภาคมีฟาร์มเลี้ยงหมูขนาดใหญ่ในจังหวัดนครปฐม ราชบุรี และชลบุรี เป็นต้น (17)

2.2 ประโยชน์ของกระดูก

การเลี้ยงสัตว์เป็นอาชีพสำคัญอย่างหนึ่งของประชาชนในแถบที่มีภูมิประเทศและอากาศเหมาะสำหรับการเกษตรกรรม เพราะนอกจากจะใช้เป็นอาหารแล้วยังเป็นอาชีพที่นำรายได้มาสู่ครอบครัวด้วย เมื่อสัตว์เลี้ยงถูกฆ่าเพื่อใช้เป็นอาหาร จะมีกระดูกเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากในสมัยก่อน

กระดูกที่เหลือหลังจากชำแหละเอาเนื้อออกแล้วส่วนใหญ่จะถูกทิ้งขว้างไปโดยเปล่าประโยชน์ มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ทำเครื่องประดับเล็กๆน้อยๆ ซึ่งนิยมเฉพาะคนบางกลุ่ม ปัจจุบันนี้กระดูกสัตว์ซึ่งเคยเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้มีผู้ศึกษาและทดลองนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นและใช้เป็นวัตถุดิบในการทำเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชนิดต่างๆ หลายประเภท (2)



ภาพประกอบ 3 กระดูกวัวและหมู
ที่มา : กระบวนการทำถ่านกระดูก

รายได้จากการจำหน่ายกระดูกสัตว์แม้จะเป็นรายได้จำนวนน้อยเมื่อเทียบกับการจำหน่ายข้าวหรือสินค้าออกอย่างอื่น แต่อาจนับได้ว่าเป็นรายได้มากพอสมควรเมื่อเทียบกับสมัยที่กระดูกถูกทิ้งขว้างไปโดยเปล่าประโยชน์ ปริมาณการส่งออกกระดูกไปจำหน่ายในต่างประเทศจำนวนมากมายในแต่ละปีที่ผ่านมาชี้แสดงว่ากระดูกเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ กระดูกประกอบไปด้วย สารอินทรีย์ร้อยละ 30 สารอนินทรีย์ร้อยละ 45 ส่วนที่เหลือเป็นน้ำ (2)

- ในร้อยละ 30 ของสารอินทรีย์นั้นประกอบไปด้วยสารคอลลาเจน (Collagen) ร้อยละ 95 ส่วนที่เหลือเป็นสารประเภทมิวโคโพลีแซคคาไรด์ (Mucopolysaccharides) อีลาสติน (elastin) และไขมัน

- ในร้อยละ 45 ของสารอนินทรีย์ในกระดูกประกอบด้วย สารแคลเซียมฟอสเฟตชนิดผลึก (crystalline calcium phosphate) ร้อยละ 85 นอกนั้นเป็นสารแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่เป็นผลึก

(noncrystalline calcium phosphate) และสารอื่นๆจำนวนเล็กน้อยเช่น แมกนีเซียม กำมะถัน โซเดียม ฟลูออรีน และอื่นๆ

จากความรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบสารต่างๆ ในกระดูก จึงได้มีการนำกระดูกไปใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายประเภท ส่วนของกระดูกที่ใช้เป็นวัตถุดิบในทางอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. น้ำจากการต้มกระดูก
2. ไขสัตว์
3. เอ็น
4. กระดูกที่เหลือ

น้ำจากการต้มกระดูกใช้ในการทำซูปสำหรับปรุงอาหาร โดยการต้มกระดูกที่มีการปรุงแต่งรสและเติมส่วนผสมบางอย่างลงไป เช่น ผงชูรส หรือ โมโนโซเดียมแอล-กลูตาโมโนไฮเดรต (Monosodium L-Glutamate Monohydrate) กระดูกสัตว์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบต้องเป็นกระดูกสดที่ยังไม่เน่าไม่มีกลิ่นเหม็นมีเศษเนื้อและไขมันติดอยู่บ้างเล็กน้อย ซูปผงที่มีจำหน่ายในท้องตลาด มีทั้งชนิดเป็นผงบรรจุซองและชนิดอัดเป็นก้อนเล็กๆ (2)

ไขสัตว์ ได้จากการต้มสกัดไขส่วนที่ติดมากับกระดูก มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง สีขุ่นขาว-เหลืองอ่อน มีส่วนผสมของของสเตียรีน (stearin) ปาล์มมิติน (palmitin) โอเลอิน (olein) และอื่นๆ ไขสัตว์ที่สกัดได้นอกจากจะใช้ในการประกอบอาหารแล้ว อาจจัดได้ว่าเป็นวัตถุดิบสำคัญอย่างหนึ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น เทียนไข น้ำมันหล่อลื่น สำหรับเครื่องจักรกลหรือข้อต่อหรือเพลลาของรถไฟและใช้แต่งผิวหนังสัตว์ (leather dressing) นอกจากนี้ไขสัตว์ยังใช้ในการสังเคราะห์สวาสเตียรีน เพื่อใช้ประโยชน์ในการทพสารกันน้ำ (water proof material) ทำหินเทียม งาม้างเทียม แต่งผิวหนังสัตว์ ใช้ในการปรับขนาดของเส้นใยสังเคราะห์ที่จะกรอเป็นเส้น ใช้เป็นส่วนผสมในสารขัดผิวโลหะและในสารยึดเหนี่ยว (adhesive paste) ฯลฯ (2)

เอ็น เป็นกลุ่มของเส้นใยที่ใช้ยึดเหนี่ยวระหว่างท่อนหรือข้อต่อระหว่างกระดูกและเป็นส่วนที่ช่วยให้แขนขาเคลื่อนไหวและงอพับได้ เอ็นเป็นเส้นใยที่เหนียวมาก เมื่อแยกออกจากกระดูกแล้วสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ อาหารปลา และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำเป็นกาว

กระดูกที่เหลือ เป็นส่วนสุดท้ายที่เหลือหลังจากเอาไข เอ็น และเศษเนื้อออกหมดแล้ว กระดูกสัตว์มีประโยชน์ดังนี้

- ทำเครื่องใช้ เครื่องประดับประเภทสร้อย กำไล กระดุม เข็มกลัด หัวเข็มขัด ด้ามมีด ด้ามปืน และสิ่งแกะสลักอื่นๆ

- กระดูกปน ใช้เป็นปุ๋ยและอาหารสัตว์

- ถ่านกระดูก ซึ่งได้จากการกลั่นทำลายกระดูกใช้สำหรับฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ดูดแก๊สพิษบางชนิด ใช้เป็นสีดำในสีเคลือบไม้ ทำให้แคลคโปร่งใส ใช้ในการกรองเพื่อดูดสีแล้ว กลิ่นของน้ำ ฯลฯ

- ถ่านกระดูก (Bone ash) ใช้ทำปุ๋ย ใช้เป็นส่วนผสมในผงขัดเพื่อขัดสิ่งสกปรกและทำความสะอาด ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา เป็นต้น

- สารประกอบฟอสเฟต เช่น คัลเซียมฟอสเฟต ไดคัลเซียมฟอสเฟตและอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการทำปุ๋ยฟอสเฟต ใช้เป็นส่วนผสมในยารักษาโรคบางชนิดใช้มันผลิตภัณฑ์ทางทันตกรรม อุตสาหกรรมผลิตแก้วและพลาสติก

- โอซีน (ossein) หรือที่เรียกว่ากระดูกแช่กรดตากแห้ง โอซีนเป็นสารที่สามารถย่อยสลายได้โดยเปปซิน (pepsin) และทริปซิน (trypsin) เมื่อต้มโอซีนกับน้ำหรือสารละลายที่มีฤทธิ์กรด จะได้สารที่มีลักษณะข้น-เหลว หรือเรียกว่า เจลาติน (gelatin) โอซีนเป็นสารประเภทคอลลาเจน (collagen) พบในกระดูกอ่อนและส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ของกระดูก (organic matrix of bone) โอซีนที่เตรียมได้จากกระดูก สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ในชีวิตประจำวันหลายชนิด เช่น ทำเจลาติน ซึ่งอาจใช้เป็นขนมหรือส่วนประกอบของอาหารประเภทเยลลี่ น้ำสลัดไอศกรีม ครีมแต่งหน้าขนมเค้ก ใช้เป็นสารทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะข้น (thickening agent) ช่วยในการเพิ่มความเหนียวในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางประเภทครีมและอิมัลชัน ใช้เลี้ยงเชื้อราเพื่อการศึกษา นอกจากนี้ โอซีนยังใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมทำฟิล์มถ่ายรูป ฟิล์มภาพยนตร์ และฟิล์มเอกซเรย์ที่ใช้ในทางการแพทย์ ใช้เคลือบกระดาษอัดรูป ใช้ทำปลอกหุ้มยาหรือแคปซูล (capsule) ใช้ทำเปลือกไส้กรอก และอื่นๆ (2)

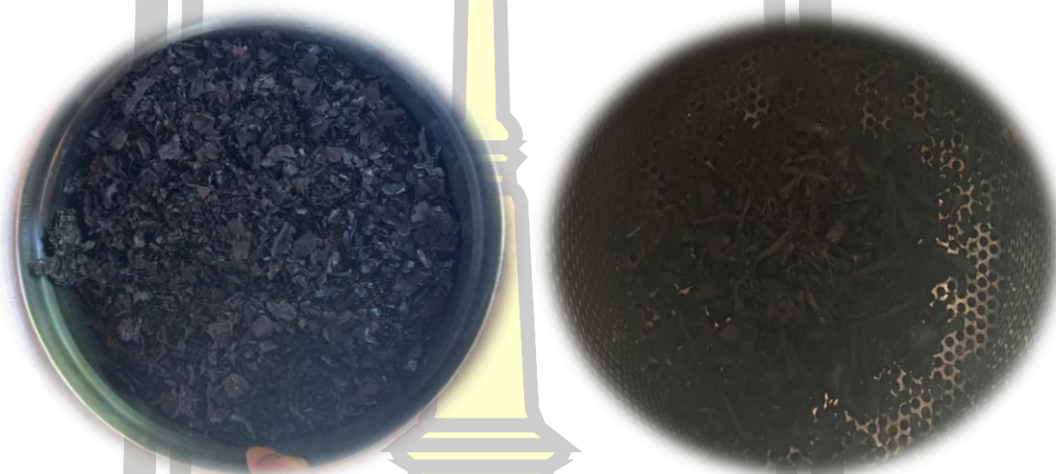
2.3 ถ่านชาร์

2.3.1 ความหมายของถ่านชาร์

ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ (biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก เรียกกระบวนการนี้ว่าการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งมีสองวิธีหลักๆ คือการแยกสลายอย่างรวดเร็วและอย่างช้า การผลิตไบโอชาร์ด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิเฉลี่ย 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของไบโอชาร์มากกว่า 50% แต่จะใช้เวลาเป็นชั่วโมง ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิเฉลี่ย 700 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) 60% แก๊สสังเคราะห์ (syngas) ได้แก่ H_2 , CO และ CH_4 รวมกัน 20% และ ไบโอชาร์ 20% (18)

ถ่านชีวภาพถูกนำมาใช้มาเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว โดยชุมชนพื้นเมืองในแถบลุ่มน้ำอะเมซอนของทวีปอเมริกาใต้ ได้ใช้เศษพืชจากพื้นที่เพาะปลูกและมูลสัตว์ เผาให้กลายเป็นถ่าน

ชีวภาพ ซึ่งเรียกชื่อตามภาษาท้องถิ่นว่า Terra Preta มีความหมายว่าโลกดำ (black earth) หมายถึง สีของดินบริเวณนั้นมีสีคล้ำจนเกือบดำ เนื่องจากดินดังกล่าวมีปริมาณธาตุอาหารหรืออินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่า พื้นที่ที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ปัจจุบันพบว่าพื้นที่ที่เคยมีการใช้ถ่านชีวภาพในพื้นที่เกษตรกรรม ในหลายพื้นที่ของอเมริกา ยุโรป และ เอเชีย เช่น เอกวาดอร์และเปรูในอเมริกาใต้ เบนิน และไลบีเรีย ในแอฟริกาตะวันตกและทุ่งหญ้าสะวันนาในแอฟริกาใต้ จีนและออสเตรเลีย เป็นต้น อีกทั้งมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับการผลิตและการประยุกต์ใช้งานถ่านชีวภาพ (19)



ภาพประกอบ 4 ภาพถ่านชาร์ที่ทำจากขี้เลื่อยและกระดุกไก่

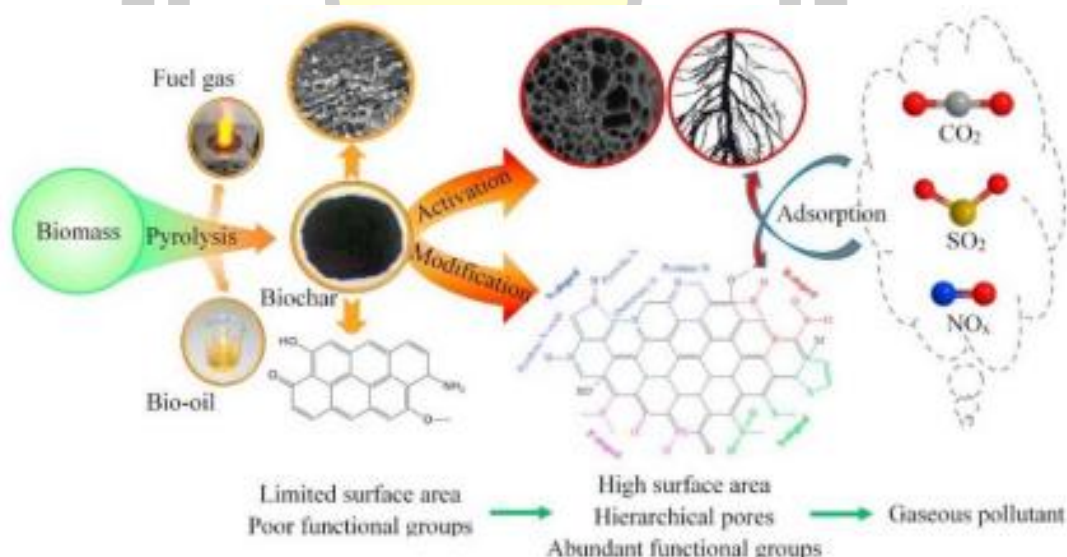
ที่มา : กระบวนการทำ Biochar

ถ่านชีวภาพ ผลิตจากชีวมวล (biomass) เช่น แกลบ ชังข้าวโพด กากอ้อย หรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ โดยกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนที่ไม่ใช้ออกซิเจน ด้วยการให้ความร้อนตั้งแต่ 10 - 500 องศาเซลเซียส กระบวนการย่อยสลายนี้นี้เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) ชีวมวลซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทคาร์บอนิล (carbonyl group) ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และอะโรมาติก (aromatic compound) (20) เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า จะทำให้ลักษณะผิวของชีวมวลเปลี่ยนไปคือ เริ่มมีรูพรุน ธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน อันได้แก่ไฮโดรเจน ออกซิเจนจะแตกตัวในรูปของแก๊ส (gasification process) ที่เรียกว่าการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) อนุภาคมูลคาร์บอนอิสระ (free - radical carbon) ที่มีอยู่จะรวมกลุ่มกันเป็นถ่านชีวภาพที่มีประจุลบ ซึ่งช่วยดูดซับไอออนโลหะหนักหรือธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ แต่การยังคงมีน้ำมันดิน (tar) ตกค้างอยู่ในช่องว่าง (pore) ทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับต่ำจึงมีการนำถ่านชีวภาพไปปรับปรุงคุณภาพดินทรายจัด (sandy soils) ตัวอย่างเช่น การใช้ปรับปรุงดินในพื้นที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ตำบลสามพระยา

อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี เนื่องจากสภาพดินในพื้นที่ดังกล่าวมีวัตถุดิบกำเนิดดิน (soil parent materials) จากหินทราย (sandstone) ทำให้ดินมีลักษณะเป็นดินปนทรายที่มีเนื้อดินค่อนข้างหยาบ และมีสภาพเป็นกรดคือ PH ประมาณ 5 – 6 อินทรีย์ที่อยู่ในดินจะจับกับธาตุอะลูมิเนียมและเหล็ก โดยมีกรดเป็นตัวดูดซับทำให้เกิดตะกอนของสารประกอบโลหะอินทรีย์ (organometallic compounds) เมื่อเวลาผ่านไป ตะกอนที่เกิดขึ้นจะสะสมและจับตัวกันเป็นชั้นดินดานแข็ง เมื่อน้ำไหลซึมลงมามันจะขังน้ำ เพราะน้ำซึมผ่านได้ยาก ทำให้รากพืชขาดอากาศหายใจ เพราะดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ จึงมีการนำถ่านชีวภาพมาผสมเพื่อให้ดินไม่จับตัวแน่น มีความสามารถในการอุ้มน้ำ โปร่งร่วนซุยยิ่งขึ้น และช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ของดินให้มีสภาพเป็นกลาง เพื่อจะได้เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ในการสร้างอาหารในดิน เพราะเมื่อดินถูกชะล้าง สารอาหารจะยึดเกาะกับถ่าน แทนที่จะถูกชะล้างออกไป (21)

2.3.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่านชาร์

คุณสมบัติและองค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะแตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป ได้แก่ ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่นๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนขณะให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยไม่มีออกซิเจนและไฮโดรเจน



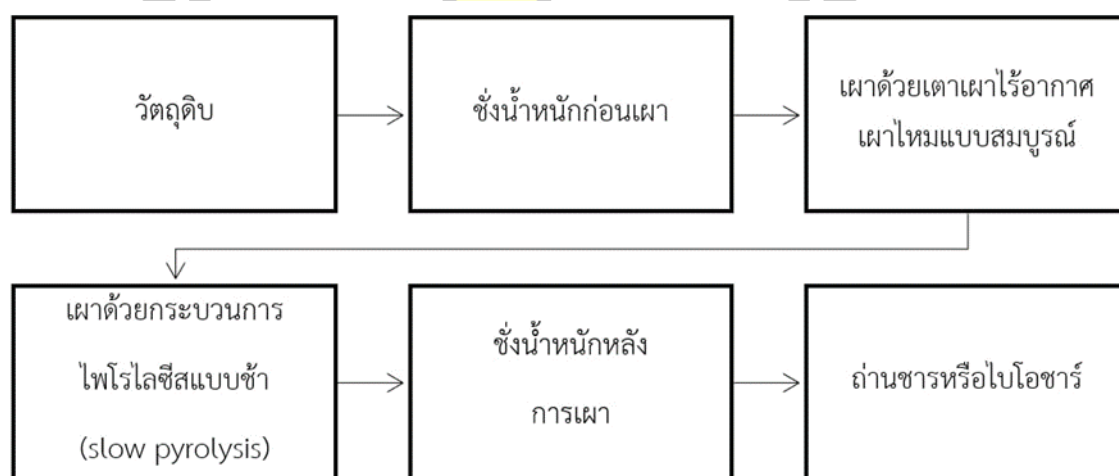
ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านไบโอชาร์

ที่มา : ไบโอชาร์ถ่านชีวภาพตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน(22)

ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุน มีองค์ประกอบของคาร์บอนไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และซีลีเนียม แต่องค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น อุปกรณ์ อุณหภูมิ และระยะเวลา เป็นต้น (23)

2.3.3 กระบวนการผลิตถ่านชาร์

การผลิตถ่านชาร์สามารถผลิตได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และ กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (slow pyrolysis) คือการเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้าๆ ในระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ส่วนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็วจะใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที ใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500-1000 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ จะได้ผลผลิตแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (23) ส่วนที่เป็นน้ำมัน (Bio-Oil) ส่วนที่เป็นแก๊ส (Bio-Gas) และส่วนที่เป็นถ่านชีวภาพ (Bio-Char)



ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการผลิตถ่านชาร์ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar)

ตารางที่ 2 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

ที่มา : องค์ความรู้เรื่องถ่านชีวภาพ (23)

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	ถ่าน (Char)	ของเหลว (Liquid)	แก๊ส (Gas)
แบบช้า (slow pyrolysis)	35%	30%	35%
- ใช้อุณหภูมิต่ำ			
- ใช้เวลาเป็นชั่วโมง			

แบบเร็ว (Fast pyrolysis) - ใช้อุณหภูมิปานกลาง-สูง - ใช้เวลาน้อยหรือสั้น (เป็นวินาที)	12%	75%	13%
--	-----	-----	-----

2.3.4 ประโยชน์ของถ่านชาร์

ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ สามารถสรุปได้ 4 ประการหลักดังนี้

1. ช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เนื่องจากถ่านชีวภาพสามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาวได้ด้วยการกักเก็บคาร์บอนในดิน
2. ช่วยปรับปรุงดินและผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเมื่อนำถ่านชีวภาพลงดิน ลักษณะความเป็นร่วนของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำและอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น
3. ช่วยผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากมวลชีวภาพด้วยการแยกสลายด้วยความร้อนจะให้พลังงานชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อการขนส่งและในระบบอุตสาหกรรมได้
4. ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีไบโอชาร์มีศักยภาพในการกำจัดของเสียที่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นมิตรได้

2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Process)

2.4.1 Resin Ion-exchange

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนหรือโพลิเมอร์แลกเปลี่ยนไอออนคือเรซินหรือโพลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นเมทริกซ์ที่ไม่ละลายน้ำ (หรือโครงสร้างที่รองรับ) โดยปกติจะอยู่ในรูปของไมโครบีดส์ขนาดเล็ก (รัศมี 0.25–1.43 มม.) ซึ่งมักเป็นสีขาวหรือสีเหลือง ประดิษฐ์ขึ้นจากซีสเตอตโพลิเมอร์อินทรีย์ โดยทั่วไป เม็ดบีดส์จะมีรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ทั้งด้านในและด้านนอก ซึ่งเป็นที่ซึ่งการดักจับไอออนเกิดขึ้นพร้อมกับการปล่อยไอออนอื่นๆ ตามมา ดังนั้น กระบวนการนี้จึงเรียกว่าการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีหลายประเภท เรซินเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ทำจากโพลีสไตรีนซัลโฟเนต (24)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการแยกสาร การทำให้บริสุทธิ์ และการปนเปื้อนต่างๆ ตัวอย่างที่พบบ่อย ได้แก่ การทำให้น้ำกระด้างและการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ในหลายกรณี เรซินแลกเปลี่ยนไอออนถูกนำมาใช้ในกระบวนการดังกล่าวเพื่อเป็นทางเลือกที่

ยืดหยุ่นกว่าการใช้ซีโอไลต์จากธรรมชาติหรือเทียม นอกจากนี้ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนยังมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการกรองไปโอดีเซล (25)

2.4.2 Membrane

เมมเบรนเป็นเครื่องกีดขวางที่ช่วยให้บางสิ่งผ่านไปได้ แต่หยุดสิ่งอื่นไว้แต่หยุดบางสิ่งไว้ สิ่งดังกล่าวอาจเป็นโมเลกุล ไอออน หรืออนุภาคขนาดเล็กอื่นๆ เยื่อสามารถแบ่งได้เป็นเยื่อสังเคราะห์ และเยื่อชีวภาพ(26)เยื่อชีวภาพรวมถึงเยื่อหุ้มเซลล์ (เปลือกนอกของเซลล์หรือออร์แกเนลล์ที่ช่วยให้องค์ประกอบบางอย่างผ่านไปได้) (27) เยื่อหุ้มนิวเคลียสซึ่งหุ้มนิวเคลียสของเซลล์ และเยื่อหุ้มเนื้อเยื่อ เช่น mucosae และ serosae เยื่อสังเคราะห์ผลิตขึ้นโดยมนุษย์เพื่อใช้ในห้่องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม (เช่น โรงงานเคมี)

แนวคิดเกี่ยวกับเมมเบรนนี้เป็นที่รู้จักตั้งแต่ศตวรรษที่ 18 แต่ไม่ค่อยมีใครใช้นอกห้่องปฏิบัติการจนกระทั่งสิ้นสุดสงครามโลกครั้งที่สอง แหล่งน้ำดื่มในยุโรปถูกทำลายจากสงครามและมีการใช้ตัวกรองเมมเบรนเพื่อทดสอบความปลอดภัยของน้ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขาดความน่าเชื่อถือ การทำงานที่ช้า การเลือกสรรที่ลดลง และต้นทุนที่สูงขึ้น เมมเบรนจึงไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง การใช้เมมเบรนในปริมาณมากครั้งแรกคือเทคโนโลยีไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน นับตั้งแต่ทศวรรษ 1980 เป็นต้นมา กระบวนการแยกสารเหล่านี้พร้อมกับการพอกติดด้วยไฟฟ้า ถูกนำมาใช้ในโรงงานขนาดใหญ่ และในปัจจุบัน บริษัทที่มีประสบการณ์หลายแห่งให้บริการในตลาด (28)

ระดับของการเลือกของเมมเบรนขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนของเมมเบรน ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน พวกมันสามารถจำแนกเป็นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน (MF) อัลตราฟิลเตรชัน (UF) นาโนฟิลเตรชัน (NF) และรีเวอร์สออสโมซิส (RO) เมมเบรนยังสามารถมีความหนาต่างๆ ได้ โดยมีโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือต่างกัน เมมเบรนสามารถเป็นกลางหรือมีประจุได้ และการขนส่งของอนุภาคอาจเป็นแบบแอกทีฟหรือแบบพาสซีฟก็ได้ หลังจากสามารถอำนวยความสะดวกโดยความดัน ความเข้มข้น สารเคมีหรือไฟฟ้าไ้ระดับสี่ของกระบวนการเมมเบรน (29)

2.4.3 Electrostatics

ไฟฟ้าสถิตเป็นสาขาหนึ่งของฟิสิกส์ที่ศึกษาเกี่ยวกับประจุไฟฟ้าขณะหยุดนิ่ง (ไฟฟ้าสถิต) ตั้งแต่สมัยโบราณ เป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุบางชนิด เช่น อำพัน จะดึงดูดอนุภาคที่มีน้ำหนักเบาหลังจากการถู คำว่าอำพันในภาษากรีกจึงเป็นที่มาของคำว่า 'ไฟฟ้า' ปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตเกิดจากแรงที่ประจุไฟฟ้ากระทำต่อกัน แรงดังกล่าวอธิบายไว้ในกฎของคูลอมบ์ (30)

แม้ว่าแรงเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตจะดูค่อนข้างอ่อน แต่แรงไฟฟ้าสถิตบางส่วนก็ค่อนข้างมาก แรงระหว่างอิเล็กตรอนและโปรตอนซึ่งรวมกันเป็นอะตอมของไฮโดรเจนนั้นแรงกว่าแรงโน้มถ่วงที่กระทำ (30)

มีตัวอย่างมากมายของปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต ตั้งแต่ปรากฏการณ์ง่ายๆ อย่างการดึงดูดของพลาสติกห่อหุ้มมือหลังจากนำออกจากบรรจุภัณฑ์ ไปจนถึงการระเบิดที่เกิดขึ้นเองของไซโลธัญพืช ความเสียหายของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างการผลิต และเครื่องถ่ายเอกสารและเลเซอร์ การทำงานของเครื่องพิมพ์ ไฟฟ้าสถิตเกี่ยวข้องกับการสะสมประจุบนพื้นผิวของวัตถุเนื่องจากการสัมผัสกับพื้นผิวอื่น แม้ว่าการแลกเปลี่ยนประจุจะเกิดขึ้นเมื่อใดก็ตามที่พื้นผิวทั้งสองสัมผัสและแยกจากกัน ผลกระทบของการแลกเปลี่ยนประจุมักจะสังเกตได้ก็ต่อเมื่อพื้นผิวยังน้อยหนึ่งพื้นผิวมีความต้านทานต่อการไหลของไฟฟ้าสูง เนื่องจากประจุที่ถ่ายโอนจะถูกขังอยู่ที่นั่นเป็นเวลานานพอสำหรับผลกระทบของพวกเขาที่จะสังเกต จากนั้นประจุเหล่านี้จะยังคงอยู่บนวัตถุจนกว่าจะไหลลงสู่พื้นหรือถูกทำให้เป็นกลางอย่างรวดเร็วโดยการคายประจุ ปรากฏการณ์ที่คุ้นเคยของ "การกระแทก" แบบคงที่ เกิดจากการทำให้ประจุในร่างกายเป็นกลางจากการสัมผัสกับพื้นผิวที่เป็นฉนวน (30)

2.4.4 Nanofiltration

Nanofiltration เป็นวิธีการกรองด้วยเมมเบรนที่ใช้รูพรุนขนาดนาโนเมตรซึ่งอนุภาคที่เล็กกว่า 10 nm จะผ่านเข้าไปในเมมเบรน เยื่อกรองนาโนมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 1-10 nm ซึ่งเล็กกว่าที่ใช้ในไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน แต่ใหญ่กว่าในรีเวิร์สออสโมซิสเล็กน้อย เมมเบรนที่ใช้ส่วนใหญ่สร้างจากฟิล์มบางโพลิเมอร์ (31) วัสดุที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือโลหะ เช่น อะลูมิเนียม (32) ขนาดของรูพรุนถูกควบคุมโดยค่า pH อุณหภูมิ และเวลาระหว่างการพัฒนา โดยมีความหนาแน่นของรูพรุนตั้งแต่ 1 ถึง 106 รูพรุนต่อ cm^2 เยื่อที่ทำจากโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและวัสดุอื่นๆ ที่คล้ายกัน เรียกว่าเยื่อ "แทร็กกิด" ซึ่งตั้งชื่อตามลักษณะการสร้างรูพรุนบนเยื่อ (33) "การติดตาม" เกี่ยวข้องกับการระดมยิงฟิล์มบางโพลิเมอร์ด้วยอนุภาคพลังงานสูง

2.4.4.1 ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดีหลักประการหนึ่งของการกรองระดับนาโนเป็นวิธีการทำให้น้ำอ่อนคือในระหว่างกระบวนการกักเก็บไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมไว้ในขณะที่ผ่านไฮเดรตโมโนวาเลนต์ ไอออนที่มีขนาดเล็ก การกรองจะดำเนินการโดยไม่ต้องเติมโซเดียมไอออนเพิ่ม เหมือนที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน (34) กระบวนการแยกสารจำนวนมากไม่ทำงานที่อุณหภูมิห้อง (เช่น การกลั่น) ซึ่งจะเพิ่มต้นทุนของกระบวนการอย่างมากเมื่อใช้ความร้อนหรือความเย็นอย่างต่อเนื่อง การแยกโมเลกุลอย่างอ่อนโยนนั่นเชื่อมโยงกับการกรองระดับนาโนที่มักจะไม่วางอยู่ในกระบวนการแยกแบบอื่น (การหมุนเหวี่ยง) นี่คือนิยามหลักสองประการที่เกี่ยวข้องกับการกรองระดับนาโน การกรองด้วยนาโนมีข้อดีอย่างมากในด้านความสามารถในการแปรรูปปริมาณมากและสร้างผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ถึงกระนั้น การกรองนาโนเป็นวิธีการกรองเมมเบรนที่ใช้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากขนาดของรูพรุนของเมมเบรนถูกจำกัดเพียงไม่กี่นาโนเมตรเท่านั้น อะไรก็ตามที่เล็กกว่า จะใช้รีเวิร์สออสโมซิส และอะไรก็ตามที่ใหญ่กว่าจะใช้สำหรับการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้การ

กรอบแบบอัลตราฟิลเตรชันในกรณีที่สามารถใช้การกรองแบบนาโนได้ เนื่องจากเป็นการกรองแบบเดิม ข้อเสียเปรียบหลักที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี เช่นเดียวกับเทคโนโลยีตัวกรองเมมเบรนทั้งหมด คือค่าใช้จ่ายและการบำรุงรักษาเมมเบรนที่ใช้ (35) เยื่อกรองนาโนเป็นส่วนที่มีราคาแพงของกระบวนการ การซ่อมแซมและการเปลี่ยนเมมเบรนขึ้นอยู่กับของแข็งที่ละลายทั้งหมด อัตราการไหลและส่วนประกอบของฟีด ด้วยการใช้นาโนฟิลเตรชันในอุตสาหกรรมต่างๆ จึงสามารถใช้การประมาณความถี่ในการเปลี่ยนได้เท่านั้น ทำให้ต้องเปลี่ยนไส้กรองนาโนในช่วงเวลาสั้น ๆ ก่อนหรือหลังการใช้งานหลักเสร็จสิ้น (36)

2.4.5 Adsorption

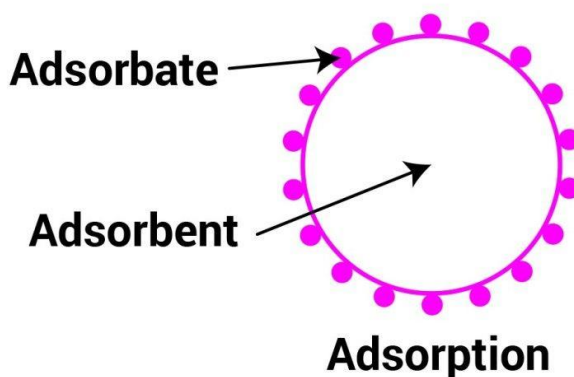
การดูดซับคือการยึดเกาะของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุลจากก๊าซ ของเหลว หรือของแข็งที่ละลายอยู่บนพื้นผิว (37) กระบวนการนี้สร้างฟิล์มของตัวดูดซับ (ตัวละลาย) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ (ตัวทำละลาย) กระบวนการนี้แตกต่างจากการดูดซับ ซึ่งของเหลว (ตัวดูดซับ) จะถูกละลายโดยหรือซึมผ่านของเหลวหรือของแข็ง (ตัวดูดซับ) การดูดซับเป็นปรากฏการณ์พื้นผิวและไม่แทรกซึมผ่านพื้นผิวไปยังกลุ่มของตัวดูดซับ ในขณะที่การดูดซับเกี่ยวข้องกับปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ แม้ว่าการดูดซับมักจะเกิดขึ้นก่อนการดูดซับก็ตาม(38) คำว่า การดูดซับ ครอบคลุมทั้งสองกระบวนการ ในขณะที่การดูดซับนั้นตรงกันข้าม

เช่นเดียวกับแรงดึงดูด การดูดซับเป็นผลมาจากพลังงานพื้นผิว ในวัสดุจำนวนมากความต้องการในการยึดเกาะทั้งหมด (ไม่ว่าจะเป็นไอออนิก โควาเลนต์ หรือโลหะ) ของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุจะเป็นไปตามข้อกำหนดของอะตอมอื่นๆ ในวัสดุ อย่างไรก็ตาม อะตอมบนพื้นผิวของตัวดูดซับไม่ได้ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของตัวดูดซับอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถดึงดูดตัวดูดซับได้ ลักษณะที่แท้จริงของพันธะขึ้นอยู่กับรายละเอียดของสปีชีส์ที่เกี่ยวข้อง แต่โดยทั่วไปแล้วกระบวนการดูดซับจะจำแนกเป็นการดูดซับทางกายภาพ (ลักษณะเฉพาะของแรงแวนเดอร์วาลส์ที่อ่อนแอ) หรือการดูดซับทางเคมี (ลักษณะเฉพาะของพันธะโควาเลนต์) นอกจากนี้ยังอาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิตด้วย (39, 40)

การดูดซับมีอยู่ในระบบธรรมชาติ กายภาพ ชีวภาพ และเคมีมากมาย และใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน (41, 42) ถ่านกัมมันต์ การดักจับและใช้ความร้อนทิ้งเพื่อจัดหาน้ำเย็นสำหรับเครื่องปรับอากาศและข้อกำหนดกระบวนการอื่นๆ (เครื่องทำความเย็นแบบดูดซับ), เรซินสังเคราะห์, การเพิ่มความจุของคาร์บอนที่ได้จากคาร์ไบด์และการทำน้ำให้บริสุทธิ์ การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน และโครมาโทกราฟีเป็นกระบวนการดูดซับที่สารดูดซับบางชนิดถูกถ่ายโอนอย่างเลือกสรรจากเฟสของเหลวไปยังพื้นผิวของอนุภาคแข็งที่ไม่ละลายน้ำที่แขวนอยู่ในภาชนะบรรจุหรือบรรจุในคอลัมน์ การใช้งานในอุตสาหกรรมเภสัชกรรมซึ่งใช้การดูดซับเป็นวิธีการที่ไม่ค่อยเป็นที่รู้จัก (43)

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) โดยตัวถูกดูดซับ หมายถึง สารที่เคลื่อนย้ายจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมหรือเกาะยังตัวดูดซับ และตัวดูดซับเป็นบริเวณที่มีตัวถูกดูดซับมาเกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับอาจเป็นชนิดของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ (44) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เช่น เกาะบนพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว การดูดซับสามารถเกิดได้ทั้งโดยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมี การดูดซับเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าจะเลือกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนักในดินหรือตะกอนดินในแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น ทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ ส่วนกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำและอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (44)



ภาพประกอบ 7 ภาพแสดงการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ
ที่มา : กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)(45)

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากแรงและพันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับ สามารถแบ่งการดูดซับออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ (46)

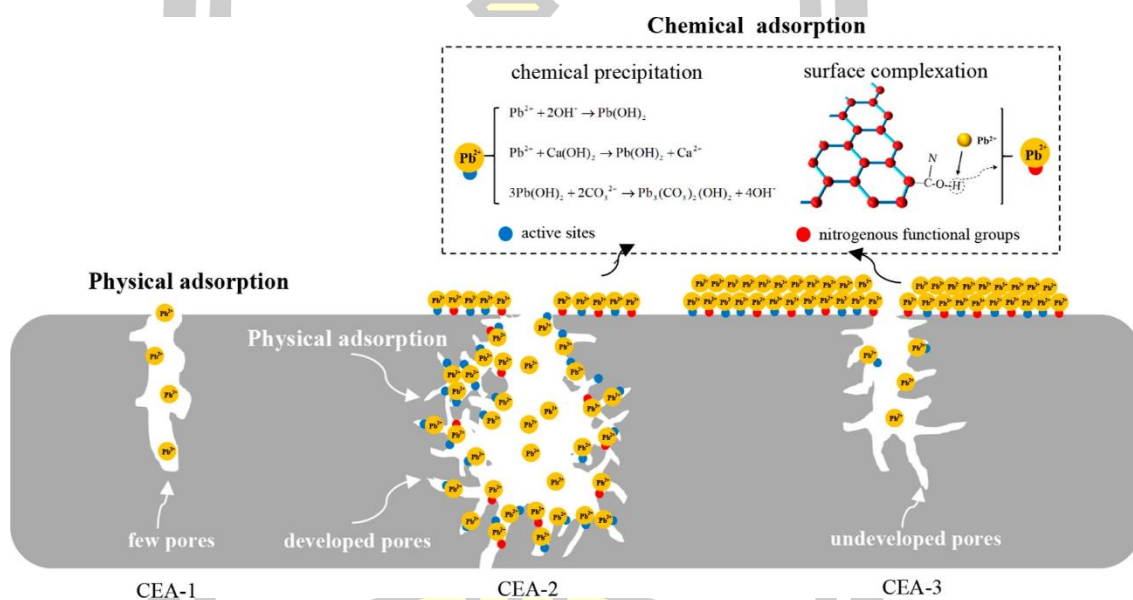
(1) การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรง van der Waals ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic

force) ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนน้อย คือ <20 kJ/mol ส่งผลให้กระบวนการเกิดการผันกลับได้ จึงง่ายต่อการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ การดูดซับประเภทนี้เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer หรือหลายชั้น (multilayer)

(2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมเต็ม และมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ พันธะเคมีนี้มีความแข็งแรง ส่งผลให้พลังงานความร้อนในการดูดซับมีค่าสูง คือ 50-400 kJ/mol การกำจัดตัวถูกดูดซับที่เกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับให้หลุดออกจึงทำได้ยาก เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น



ภาพประกอบ 8 การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

ที่มา : กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) (45)

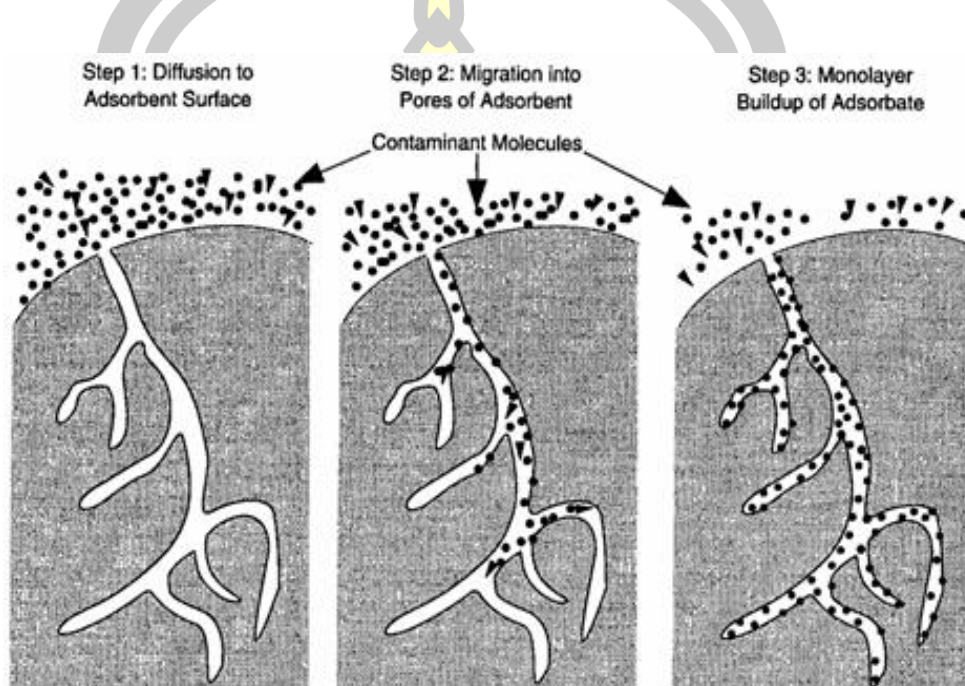
ขั้นตอนของการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ (47)

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ด้วยการพา (bulk solution transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังชั้นล้อมรอบ (boundary layer) ที่เป็นน้ำ (หรือฟิล์มของน้ำ) ที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับ (ของแข็ง) การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้อาจเกิดจากการปั่นป่วนของน้ำที่มาจาก การไหลของน้ำหรือการกวนผสมได้

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่กระจายภายนอก (external diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง เกิดจากการแพร่กระจายของ

โมเลกุลเนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างชั้นล้อมรอบภายนอกและชั้นฟิล์มของน้ำแตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 3 การดูดซับ (adsorption) เป็นการเกิดปฏิกิริยาของตัวถูกละลายกับอะตอมที่พื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง นำไปสู่การดูดซับแบบกายภาพที่มาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรือดูดซับแบบเคมีด้วยการเกิดพันธะโคเวเลนต์



ภาพประกอบ 9 กลไกการดูดซับ

ที่มา : กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) (45)

2.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ในสภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของไหล (fluid phase concentration) กับ ความเข้มข้นของของแข็ง (Solid phase concentration) ที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งสามารถใช้ความสัมพันธ์ของไอโซเทอมดังกล่าวมาอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วสารที่ถูกดูดซับจะกระจายอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เหลืออยู่ในของไหลกับส่วนที่ถูกดูดเข้าไปในของแข็ง โดยคำนวณได้จากสมการสมดุลมวลสาร (Mass balance) ดังแสดงในสมการที่ 2.1 (48)

$$q = \frac{(C_1 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2.1)$$

เมื่อ

q	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับหนัก 1 กรัม
C_1	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C_e	=	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
m	=	มวลของสารดูดซับ (กรัม)

โดยทั่วไปสมการที่อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับได้มีรายละเอียด ดังนี้

2.5.2.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) (49)

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

1. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
3. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นชั้นเดียวเท่านั้น สมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้ (49)

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

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

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_e} + \frac{C_e}{q_e} \quad (2.3)$$

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 (49)

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L \cdot C_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible) (49)

2.5.2.2 ไอโซเทอมแบบฟรุนดิส (Freundlich isotherm) (49)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็น ไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกละลายจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) (49)

$$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$$

(2.5)

$$\log q_e = \frac{1}{n} \cdot \log C_e + \log K_F$$

(2.6)

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับถ้า น้อยกว่า 1 และอธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ (49)

2.5.2.3 ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm) (49)

แบบจำลองแบบทอธเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองชอลแลงเมียร์ และสามารถใช้ได้ทั้งระบบที่มีความดันต่ำและความดันสูง (49)

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

(2.7)

เมื่อ	q	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)
	q_m	คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/L)
	B	คือ พารามิเตอร์ของไอโซเทอมบาร์ (bar^{-1})
	P	คือ ความดันที่สมดุล (bar^{-1})
	n	คือ พารามิเตอร์ของไอโซเทอม

2.5.2.4 ไอโซเทอมแบบเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm) (49)

แบบจำลองของเรดลิค-เพเทอร์สันเป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานของแลงเมียร์และฟรุนดิส ดังนั้นกลไกการดูดซับจึงเป็นการผสมผสาน แบบจำลองนี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวในอุดมคติ (49)

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

เมื่อ	K_{RP}	คือ ค่าคงที่ Redlich-Peterson ($L \cdot g^{-1}$)
	a_{RP}	คือ ค่าคงที่ Redlich-Peterson (mg/L)
	g	คือ เลขชี้กำลังควรน้อยกว่า 1

2.5.2.5 ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm) (49)

แบบจำลองของหลิวเป็นแบบจำลองที่ได้จากการรวมกันของแลงเมียร์และฟรุนดิส แต่สมมติฐานของแบบจำลองแลงเมียร์และสมมติฐานการดูดซับที่ไม่มีที่สิ้นสุดของแบบจำลองของฟรุนดิสจะถูกทิ้งไป แบบจำลองของหลิวคาดการณ์ว่าตำแหน่งของตัวดูดซับไม่สามารถมีพลังงานเท่ากันได้ (49)

ดังนั้นตัวดูดซับจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันที่โมเลกุลต้องการยึดเกาะ อย่างไรก็ตาม ความอึดตัวของตำแหน่งตัวดูดซับควรเกิดขึ้นแตกต่างจากแบบจำลองฟรุนดิส (49)

$$q_e = \frac{q_m (k_g \cdot C_e)^{1/n_g}}{1 + (k_g \cdot C_e)^{1/n_g}} \quad (2.9)$$

เมื่อ	K_g	คือ ค่าคงที่สมดุลของหลิว ($L \cdot mg^{-1}$)
	N_g	คือ เลขชี้กำลังแบบไร้มิติของสมการ
	q_m	คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ($mg \cdot g^{-1}$)

2.5.2.6 ไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm) (49)

สมการของเทมคินเป็นการอธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งถูกพัฒนามาจาก
กระบวนการที่ การเปลี่ยนแปลงของความร้อนในการดูดซับ และมีรูปแบบสมการ (2.10) และ
(2.11)

$$q_e = b_t \cdot \ln(k_t \cdot C_e) \quad (2.10)$$

$$q_e = \beta \ln K + \beta \ln C_e \quad (2.11)$$

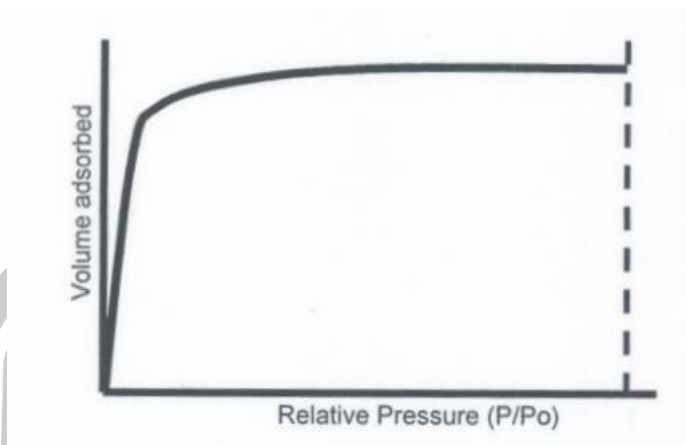
เมื่อ	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.314 (J/molK)
	K _T	คือ ค่าคงที่สมดุล (kJ/mg)
	B	คือ พลังงานการดูดซับ (kJ/mol)
	β	คือ ค่าคงที่ของเทมคิน (mol ² /kJ ²)

2.5.3 ชนิดของไอโซเทอม

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับไว้ ณ ความดันย่อยหนึ่งๆ ที่อุณหภูมิคงที่โดยมีการแบ่งประเภทไอโซเทอมของการดูดซับออกเป็น 5 แบบ คือ (50)

2.5.3.1 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

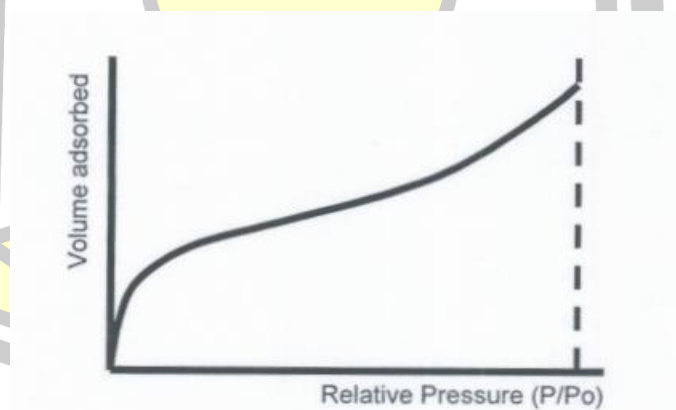
พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 10 ไอโซเทอม Type I Isotherm

ที่มา : ชนิดของไอโซเทอม (50)

2.5.3.2 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

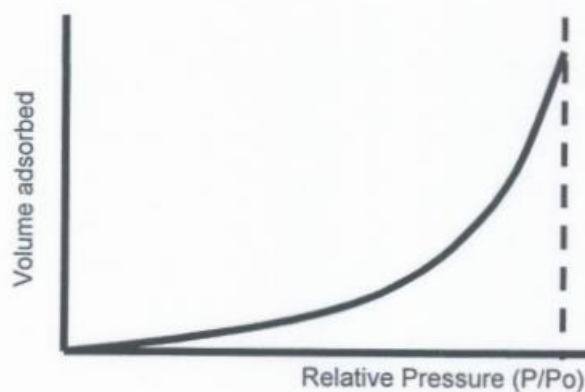


ภาพประกอบ 11 ไอโซเทอม Type II Isotherm

ที่มา : ชนิดของไอโซเทอม (50)

2.5.3.3 Type III Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ โดยจะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น

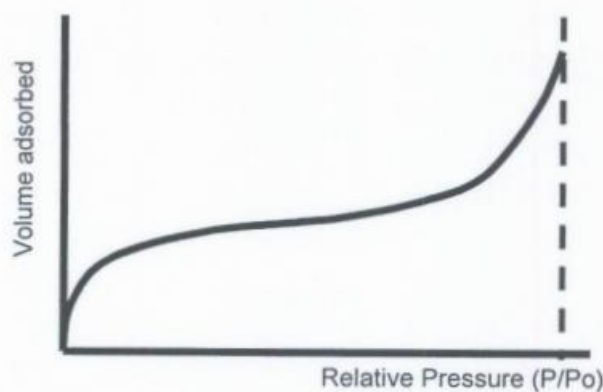
คล้าย Type II แต่การดูดซับที่เพิ่มขึ้น จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง



ภาพประกอบ 12 ไอโซเทอม Type III Isotherm

ที่มา : ชนิดของไอโซเทอม (50)

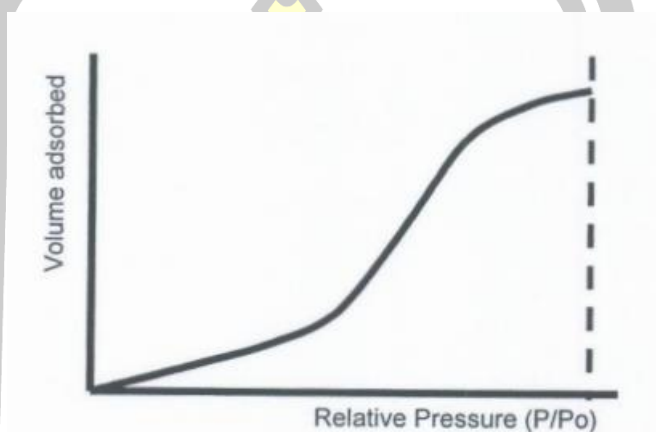
2.5.3.4 Type IV Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวถูกดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ และเกิดการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น คล้าย Type II แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจาก รูพรุนแคปิลารี ภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชื้นที่เพิ่มขึ้น เมื่อ Relative pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น



ภาพประกอบ 13 ไอโซเทอม Type IV Isotherm

ที่มา : ชนิดของไอโซเทอม (50)

2.5.3.5 Type V Isotherm เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจาก รูพรุนแคปิลารี ภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว เป็นผลจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับมีค่าน้อย ๆ แต่จะต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) โดยไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยมากนัก



ภาพประกอบ 14 ไอโซเทอม Type V Isotherm

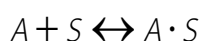
ที่มา : ชนิดของไอโซเทอม (50)

2.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย (51)

1. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง Pseudo-first-order (PFO)

จากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยา (51)



(2.12)

โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (Adsorbate) 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 $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการคือ

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 \cdot t)] \quad (2.14)$$

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. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ (51)



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

$$q_t = \frac{k_2 \cdot q_e^2 \cdot t}{1 + q_e \cdot k_2 \cdot t} \quad (2.18)$$

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 $1/k_2 q_e^2$

3. แบบจำลอง Elovich

สมการของ Elovich ได้รับการพัฒนาโดย Zeldowitsch (52) อย่างกว้างขวางเพื่อกำหนดการดูดซับก๊าซบนวัสดุที่เป็นของแข็ง (53) สมการเชิงประจักษ์กึ่งนี้ยังใช้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำหนดจลนพลศาสตร์ของลำดับที่สองสมมติว่าพื้นผิวที่เป็นของแข็งของแข็งนั้นมีความหลากหลายแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสมการนี้ไม่แนะนำให้ใช้กลไกการดูดซับที่แน่นอน (54) แบบจำลองนี้กำหนดจลนศาสตร์ของกระบวนการทางเคมี

สมการ Elovich แทบจะไม่ได้รับการฝึกฝนเพื่อการดูดซับสถานะของเหลวสมการ Elovich เป็นสมการอัตราอื่นตามความสามารถในการดูดซับซึ่งเขียนดังนี้

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

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

a_E คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แสดงถึงอัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg/g min)

b_E คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แทนค่าคงที่การปลดปล่อย (g/mg)

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

แฟร็กทัล p เหมือนหลอกรุ่นแรก (FPFO) ยิ่งไปกว่านั้นตามที่กล่าวโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ Azizian เกี่ยวกับสมการอัตรา Langmuir (55) และการได้มาของแบบจำลองคำสั่งผสม 1,2 โดย Marczewski (56) แบบจำลองลำดับแรกหลอกสามารถมาจากแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir (55) หรือ MOE (56) ภายใต้การพิจารณาที่แตกต่างกัน ดังนั้นรูปแบบที่เหมือนเศษส่วนของมันจึงสามารถได้มาจาก Fractal - เช่น Langmuir kinetic model หรือ Fractal - เช่น MOE (ภาควิชาเคมี วิศวกรรมสถาบันอินเดียน, 2562)

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

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

5. Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)

เศษส่วน - เหมือนลำดับที่สอง (FL-PSO) เศษส่วนอีกครั้งเช่นรูปแบบของรูปแบบคำสั่งหลอกที่สองสามารถได้มาจากเศษส่วน - เช่นแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir หรือ เศษส่วนเช่น MOE ดังต่อไปนี้ (57, 58) (ภาควิชาเคมี วิศวกรรมสถาบันอินเดียน, 2562)

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

เมื่อ	u_{FPSO}^2	คือ การคูณ q_e และ k'_{FPSO} (1/min)
	u_{FPSO}^1	คือ เศษส่วนเช่นค่าสัมประสิทธิ์อัตราจลน์ลำดับที่สอง (s/mg min)
	q_e	คือ ปริมาณตัวดูดซับที่ดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

6. แบบจำลอง General-order

แบบจำลอง General-order เป็นสมการจลนพลศาสตร์ลำดับทั่วไปของการดูดซับ ซึ่งใช้ได้สำหรับค่า n ไม่เท่ากับ 1 เป็นสมการพิเศษที่ถูกดัดแปลงมาจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (59)

$$q_t = q_e - \frac{q_e}{\left[k_N (q_e)^{n-1} \cdot t \cdot (n-1) + 1 \right]^{1/1-n}} \quad (2.23)$$

2.7 ทองแดง

ทองแดง (copper) นับเป็นโลหะที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งานเป็นเวลานาน ทองแดงมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu ซึ่งมาจากภาษาลาตินว่า Cuprum หมายถึง ชื่อเกาะไซปรัส (Cyprus) เป็นแหล่งแร่ทองแดงขนาดใหญ่ที่มีการค้นพบและนำโลหะทองแดงมาใช้ประโยชน์ โดยนำมาทำเครื่องมือใช้สอยและอาวุธต่าง ๆ แม้ในปัจจุบันทองแดงก็ยังเป็นโลหะที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นที่สำคัญหลายประการ แร่ทองแดงสามารถพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญของโลก ได้แก่ ชิลี เปรู สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เป็นต้น โดยเหมืองแร่ทองแดงที่ใหญ่ที่สุดในโลกอยู่ที่ชุกคามาตา ประเทศชิลีรวมถึงประเทศเพื่อนบ้านของประเทศไทยอย่างประเทศสปป.ลาว (60)

ปัจจุบันมีการนำโลหะทองแดงมาใช้เป็นส่วนผสมของทอง และเงินมากขึ้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง คงสวยงาม และทนต่อการกัดกร่อน โดยใช้โลหะทองแดงในรูปทองแดงเจือสำเร็จรูป ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ง่าย โลหะทองแดงบริสุทธิ์ใช้เรียกโลหะทองแดงที่มีส่วนผสมไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก และใช้คำว่า โลหะทองแดงผสมกับโลหะทองแดงที่มีทองแดงไม่ต่ำกว่า 40% แต่ไม่มากกว่า 99% โดยน้ำหนัก (61)

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 15 ทองแดง

ที่มา : ทองแดงในน้ำเสีย (62)

2.7.1 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดง เป็นโลหะหนักที่สามารถถูกดูดซึมได้ในลำไส้ส่วนบนซึ่งซึมผ่านบริเวณผนังลำไส้ และเคลื่อนที่ไปที่ตับ ก่อนรวมตัวกับน้ำดีและหลั่งมาพร้อมกับน้ำดีที่ลำไส้แล้วขับออกไปพร้อมกับอุจจาระหรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้อีกประมาณ 30% ก่อนเข้าสะสมที่กระดูก เนื้อเยื่อของกล้ามเนื้อ เนื้อเยื่อตับ และสมองโดยสะสมมากที่สุดที่ตับ และสมอง หากร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากและเกินความต้องการของร่างกาย ทองแดงจะก่อความเป็นพิษขึ้น ได้แก่ทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียน ปวดท้อง ท้องเสียเกิดการอักเสบของเนื้อเยื่อในช่องท้อง และกล้ามเนื้อ เลือดออกในกระเพาะเกิดโรคโลหิตจาง หัวใจทำงานผิดปกติ ภูมิคุ้มกันร่างกายเสื่อมและเกิดความผิดปกติทางจิต (61)

ถ้าได้รับทองแดงติดต่อกันเป็นเวลานานทำให้เกิดพิษเรื้อรัง ตับ และไตทำงานผิดปกติ ไม่สามารถขับทองแดงออกได้จนทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า โรควิลสัน (Wilson' Diseases) โดยผู้ป่วยมีการสะสมทองแดงในตับมากกว่าปกติเนื่องจากร่างกายไม่สามารถขับทองแดงออกทางท่อน้ำดีเข้าสู่ลำไส้ได้และเมื่อตับมีทองแดงอึดตัว ทองแดงจะแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือดทำให้ทองแดงไปพอกอยู่ตามอวัยวะต่างๆ ที่สำคัญ เช่น สมอง กระดูกตา และไตซึ่งทำให้อวัยวะเหล่านี้พิการได้ ส่วนอาการ

ภายนอกที่แสดงออก คือกล้ามเนื้อตามร่างกายสั่นอยู่ตลอดเวลา พบอาการกล้ามเนื้อเกร็งมีการไหลของน้ำมูก และน้ำลาย ผู้ป่วยพูดจาลำบากแต่ความรุนแรงจะแตกต่างกันในแต่ละคน ขึ้นอยู่กับปริมาณที่สะสมและระยะเวลาที่ได้รับ (62)

ตารางที่ 3 ความต้องการทองแดงของร่างกาย

ที่มา : ทองแดง(Copper) ประโยชน์และพิษทองแดง (61)

อายุ	ปริมาณทองแดง (mg/day)
3 - 5 เดือน	0.5-0.7
6 - 11 เดือน	0.7-1.0
1 - 6 ปี	1.0-2.0
7 - 9 ปี	2.0-2.5
10 ปี ขึ้นไป	2.0-3.0

แหล่งอาหารที่ให้ทองแดง (61)

1. แหล่งอาหารที่มีทองแดงประมาณ 0.3-2.0 mg/100 g หรือมากกว่า ได้แก่ ตับ ไต อาหารทะเล เมล็ดธัญพืช และผลไม้เปลือกแข็ง เป็นต้น
2. แหล่งอาหารที่มีทองแดงประมาณ 0.1-0.3 mg/100 g ได้แก่ ผัก และผลไม้ทั่วไป
3. แหล่งอาหารที่มีทองแดงน้อยกว่า 0.1 mg/100 g ได้แก่ ปลา และไก่

อาการขาดทองแดง (61)

1. เกิดภาวะหรือโรคโลหิตจาง
2. เกิดภาวะนิวโทรพีเนีย (neutropenia) และลูโคพีเนีย (leukopenia)
3. เกิดภาวะกระดูกพรุน กระดูกแตกหรือหักง่าย
4. หลอดเลือดยืดหยุ่นน้อยลง ทำให้หลอดเลือดแตกง่าย มีภาวะเลือดคั่งในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆ
5. ภูมิคุ้มกันต่ำ ติดเชื้อ และป่วยได้ง่าย
6. ระดับคอเลสเตอรอลในเลือดเพิ่มสูงขึ้น
7. เกิดภาวะทนต่อน้ำตาลกลูโคสผิดปกติ

2.7.2 การกำจัดทองแดงในน้ำเสีย

ในปัจจุบันประเทศไทยได้ออกกฎหมายกำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณทองแดงได้ไม่เกิน 2 mg/L โดยทองแดงในน้ำเสียนั้นจะพบอยู่ในหลายรูปแบบ เนื่องจากกระบวนการทางเคมีและการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเกลือหรือตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ต้องเลือกใช้วิธีที่มีความเหมาะสมในการกำจัด ส่วนมากจะนิยมใช้วิธีทำให้ตกตะกอนหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งประกอบ ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การระเหย (evaporation) และกระบวนการทางไฟฟ้า (electrodialysis) เป็นต้น การแลกเปลี่ยนไอออนด้วย เรซินเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง แม้ว่าเรซินที่ใช้แล้วจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการทำรีเจนเนอเรชัน (regeneration) ด้วยกรดแต่เมื่อใช้งานไปนานๆ ประสิทธิภาพของเรซินก็จะค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกหรือกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทองแดงน้อยกว่า 200 mg/L ส่วนกระบวนการตกตะกอนของทองแดง ณ พีเอชที่เป็นด่างด้วยการเติม สารเคมี ได้แก่ โซดาไฟ (NaOH) เพื่อให้ทองแดงตกตะกอนในรูปคิวปริกไฮดรอกไซด์ (46)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ด้วยความต้องการเนื้อวัวที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก กระดูกวัวจำนวนมากจึงถูกปล่อยทิ้งเป็นขยะมูลฝอย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการศึกษาคูสมบัติทางเคมีกายภาพของถ่านจากกระดูกวัว (ซีโครง สะบัก สันหลัง และขา) และพฤติกรรมการดูดซับทองแดงในสารละลายที่เป็นน้ำ ถ่านกระดูกถูกไพโรไลซ์ที่อุณหภูมิ 500°C และมีปริมาณเถ้าประมาณ 85.08% แม้ว่าถ่านกระดูกที่ขาค่าจะสูงค่าสูงกว่าถ่านกระดูกซีโครงแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะที่ใหญ่กว่า ($172 \text{ m}^2/\text{g}$) เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กกว่า (7.7 nm) และกลุ่มการทำงานพื้นฐานมากกว่าถ่านประเภทอื่นๆ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดแตกต่างกันไปตั้งแต่ 72.53 ถึง 83.71 g/Kg โดยที่กระดูกซีโครงแสดงลักษณะการดูดซับที่ดีที่สุด รองลงมาคือกระดูกสะบัก กระดูกสันหลัง และขา การวิเคราะห์สเปกตรัมแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับของ Cu(II) บนถ่านกระดูกนั้นสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับลักษณะของรูพรุนบนพื้นผิว การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับและลักษณะทางเคมีกายภาพของถ่านบ่งชี้ว่าการดูดซับ Cu(II) ในถ่านกระดูกวัวเป็นการดูดซับทางเคมีที่พื้นผิวเป็นหลัก จากคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและพฤติกรรมการดูดซับที่แตกต่างกัน ถ่านกระดูกที่ผ่านการไพโรไลซ์จากซีโครงวัวจึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากกระดูกสัตว์แบบจำแนก รวมถึงการใช้ถ่านกระดูกคัดเกรดเป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำที่ไม่ต้องผ่านการบำบัดด้วยสารเคมี (63)

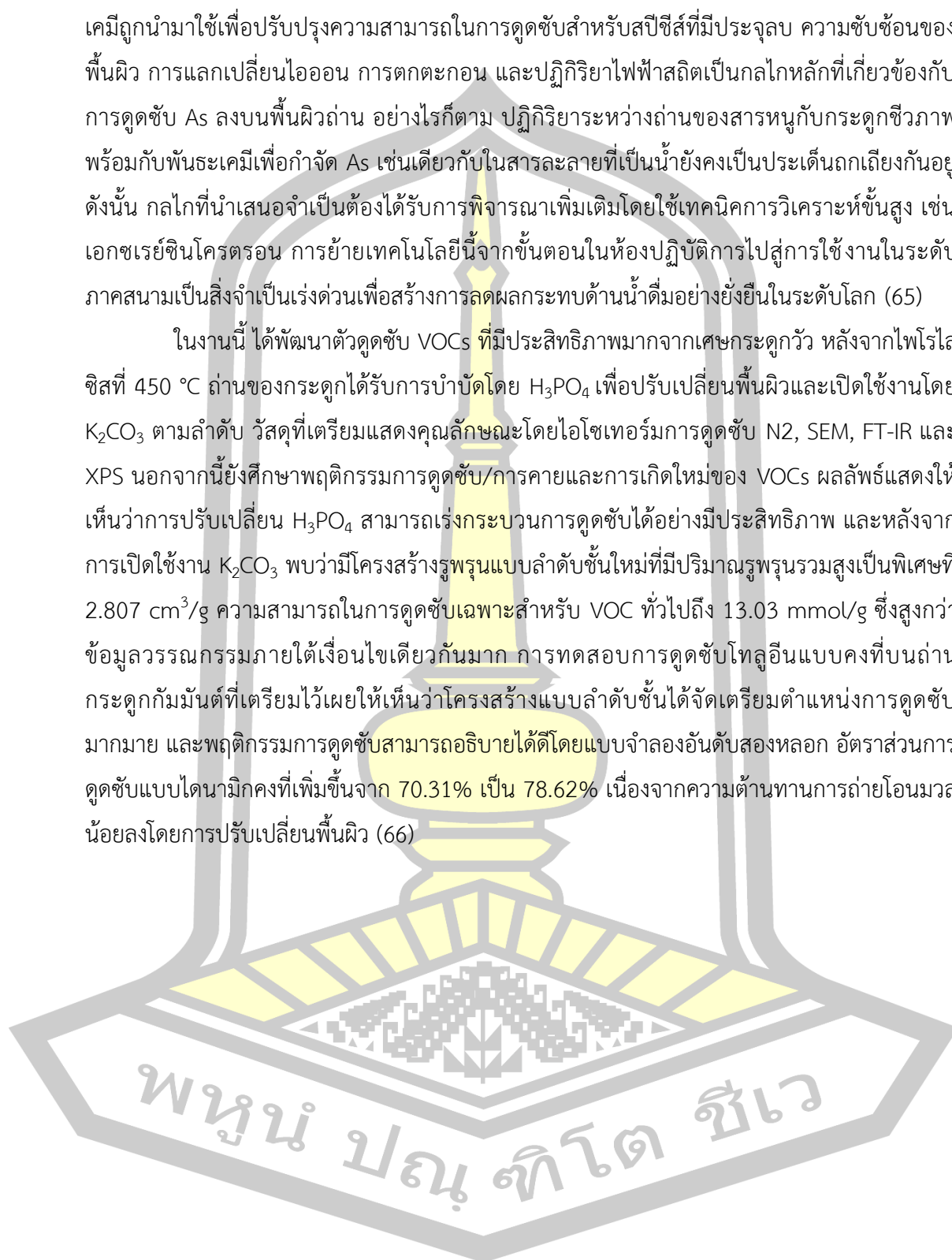
ถ่านกระดุกสุกร คือ เศษกระดุกสุกรที่เหลือจากการเผาไหม้ ศึกษาการดูดซับโคบอลต์ต่อถ่านกระดุกสุกร การศึกษาจลนพลศาสตร์แบบกลุ่มแสดงให้เห็นว่าการดูดซับอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นในช่วง 5 นาทีแรก และตามมด้วยกระบวนการแพร่ภายในอนุภาคที่ช้ามาก จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามสมการวินาทีเทียม ซึ่งบ่งชี้กลไกหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับในสภาวะสมดุลแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไอโซเทอร์มของ Freundlich อธิบายข้อมูลการดูดซับได้อย่างน่าพอใจ การปรากฏตัวของไอออนร่วมมีผลยับยั้งการดูดซับโคบอลต์ของถ่านกระดุกอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทองแดงและสังกะสีมีสัมพรรคภาพกับพื้นผิวถ่านกระดุกสูงกว่าโคบอลต์ ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายและการวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนไอออนเกี่ยวข้องกับการกำจัด Co ออกจากสารละลายในช่วงความเข้มข้นของโคบอลต์เริ่มต้นที่แน่นอน (64)

ผู้คนหลายล้านคนทั่วโลกต้องทนทุกข์ทรมานหรือมีแนวโน้มจะมีปัญหาสุขภาพที่เกิดจากความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่ม หนึ่งในวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดต้นทุนในการกำจัดฟลูออไรด์คือการใช้ถ่านกระดุก ในการทบทวนนี้ ได้มีการกล่าวถึงคุณสมบัติทางโครงสร้างและความสัมพันธ์ในการจับตัวของฟลูออไรด์ไอออนจากแหล่งน้ำต่างๆ ผลของเงื่อนไขการทดลองในการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของฟลูออไรด์ไอออนโดยใช้ตัวอย่างถ่านกระดุกได้รับการแก้ไขแล้ว ดูเหมือนว่าคุณสมบัติพื้นผิวและสภาวะของการสร้างถ่านกระดุก เช่น อุณหภูมิและเวลาที่อยู่อาศัยมีบทบาทสำคัญในการออกแบบกระบวนการกำจัดฟลูออไรด์ที่เหมาะสมที่สุด อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดฟลูออไรด์ดูเหมือนจะอยู่ในช่วง 500–700 °C และเวลาพัก 2 ชั่วโมง นำเสนอการใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบสมดุลต่างๆ สำหรับกลไกการดูดซับฟลูออไรด์ที่ไม่เข้าใจ ได้มีการอภิปรายผลของการดัดแปลงถ่านกระดุกด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ และเสนอคำแนะนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดต่อไป ต้นทุนการผลิตถ่านกระดุกและระบบบำบัดขนาดใหญ่ยังถูกกล่าวถึงตามข้อมูลที่มีอยู่จากแหล่งข้อมูลทางวิทยาศาสตร์และการค้า ความท้าทายกับการออกแบบ defluoridation ภายในประเทศที่มีอยู่ได้รับการเน้นย้ำและให้คำแนะนำสำหรับการออกแบบแนวคิดใหม่ (4)

สารหนู (As) เป็นสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นใหม่ทั่วโลกซึ่งเป็นภัยคุกคามต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ประวัติโดยสังเขปของการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพและถ่านกระดุกได้เชื่อมโยงความพยายามในการกำจัด As ออกจากน้ำในระดับที่มากพอสมควร การทบทวนเชิงวิพากษ์นี้พยายามให้ภาพรวมที่ครอบคลุมเป็นครั้งแรกเกี่ยวกับศักยภาพของชีวภาพและกระดุกถ่านในการตรึงอินทรีย์ในน้ำ มันทพยายามที่จะเสนอการประเมินอย่างมีเหตุผลของสิ่งที่มีอยู่และสิ่งที่ต้องทำในการวิจัยในอนาคต โดยเน้นสำหรับความเป็นพิษของความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ผ่านการสัมผัสกับน้ำที่ปนเปื้อนอย่างเฉียบพลันและเรื้อรัง ถ่านชีวภาพและถ่านกระดุกได้รับการยอมรับว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับถ่านกัมมันต์เนื่องจากต้นทุนการผลิตและการกระตุ้นที่ต่ำกว่า การปรับเปลี่ยนพื้นผิวด้วยวิธีการทาง

เคมีถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซับสำหรับสปีชีส์ที่มีประจุลบ ความซับซ้อนของพื้นผิว การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอน และปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตเป็นกลไกหลักที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ As ลงบนพื้นผิวถ่าน อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาระหว่างถ่านของสารหนูกับกระดูกชีวภาพพร้อมกับพันธะเคมีเพื่อกำจัด As เช่นเดียวกับในสารละลายที่เป็นน้ำยังคงเป็นประเด็นถกเถียงกันอยู่ ดังนั้น กลไกที่น่าเสนอจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น เอกซเรย์ซินโครตรอน การย้ายเทคโนโลยีนี้จากขั้นตอนในห้องปฏิบัติการไปสู่การใช้งานในระดับภาคสนามเป็นสิ่งจำเป็นเร่งด่วนเพื่อสร้างการลดผลกระทบด้านน้ำดื่มอย่างยั่งยืนในระดับโลก (65)

ในงานนี้ ได้พัฒนาตัวดูดซับ VOCs ที่มีประสิทธิภาพมาจากเศษกระดูกวัว หลังจากไพโรไลซิสที่ 450 °C ถ่านของกระดูกได้รับการบำบัดโดย H_3PO_4 เพื่อปรับเปลี่ยนพื้นผิวและเปิดใช้งานโดย K_2CO_3 ตามลำดับ วัสดุที่เตรียมแสดงคุณลักษณะโดยไอโซเทอร์มการดูดซับ N_2 , SEM, FT-IR และ XPS นอกจากนี้ยังศึกษาพฤติกรรมดูดซับ/การคายและการเกิดใหม่ของ VOCs ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยน H_3PO_4 สามารถเร่งกระบวนการดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ และหลังจากการเปิดใช้งาน K_2CO_3 พบว่ามีโครงสร้างรูพรุนแบบลำดับชั้นใหม่ที่มีปริมาณรูพรุนรวมสูงเป็นพิเศษที่ $2.807 \text{ cm}^3/\text{g}$ ความสามารถในการดูดซับเฉพาะสำหรับ VOC ทั้งหมดถึง 13.03 mmol/g ซึ่งสูงกว่าข้อมูลวรรณกรรมภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมาก การทดสอบการดูดซับโพลีอินแบบคงที่บนถ่านกระดูกกัมมันต์ที่เตรียมไว้เผยให้เห็นว่าโครงสร้างแบบลำดับชั้นได้จัดเตรียมตำแหน่งการดูดซับมากมาย และพฤติกรรมดูดซับสามารถอธิบายได้ดีโดยแบบจำลองอันดับสองหลอก อัตราส่วนการดูดซับแบบไดนามิกคงที่เพิ่มขึ้นจาก 70.31% เป็น 78.62% เนื่องจากความต้านทานการถ่ายโอนมวลน้อยลงโดยการปรับเปลี่ยนพื้นผิว (66)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่ทำการวิจัย

การเตรียมถ่านไบโอชาร์จากกระดุกว้าวและกระดุกหมู ดำเนินการที่ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

การทดลองวิจัย ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรจำเพาะของรูพรุน ดำเนินการที่ตึกศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคามและการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของถ่านชาร์ที่เตรียมได้การถ่ายภาพของถ่านชาร์จากกระดุกว้าวและหมูที่เตรียมได้ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ดำเนินการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 การเตรียมถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

3.2.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้สมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process) ดังแสดงในภาพประกอบ 17

3.2.1.2 แก๊สหุงต้มใช้ทำความร้อน

3.2.2 สารเคมีและวัสดุดิบ

3.2.2.1 กระดุกว้าวและหมูจาก อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

3.2.2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรดเบส (pH Meter)

3.2.2.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.2.5 ควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

3.2.2.6 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.2.2.7 กระดาษกรอง GF/C

3.2.2.8 ชุดกรอง ประกอบด้วย กรวยบุษเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม. และขวดกรอง

3.2.2.9 ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2.2.10 จุกปิดแก้ว (Glass stopper)

3.2.2.11 ปากคีบ (Forceps pointed end)

3.2.3 วิธีการทดลอง

3.2.3.1 การเตรียมถ่านกระดุกวัวและหมู

- นำกระดุกโคและสุกรที่ได้ไปต้มทำให้สุก หลังจากนั้นนำมาเลาะเนื้อออกจากกระดุกให้หมดหรือทำให้เหลือเนื้อน้อยที่สุดแล้วนำกระดุกที่ผ่านการต้มและเลาะแล้วไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนักก่อนเผา

- นำไปเผาด้วยเตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process) ขนาดเตาเผามีเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ประมาณ 60 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 2.5 เมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 17

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

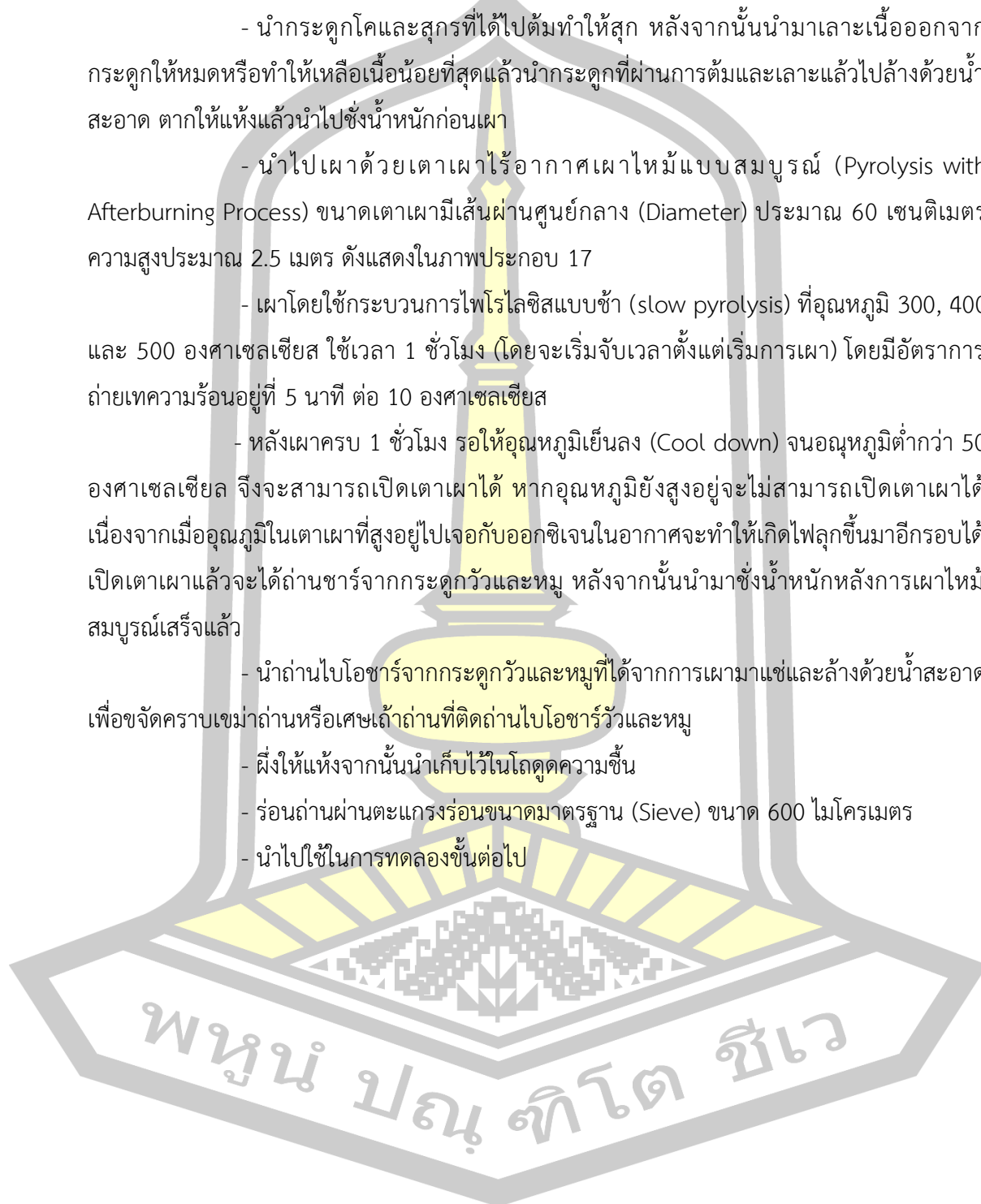
- หลังเผาคرب 1 ชั่วโมง รอให้อุณหภูมิเย็นลง (Cool down) จนอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถเปิดเตาเผาได้ หากอุณหภูมิยังสูงอยู่จะไม่สามารถเปิดเตาเผาได้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในเตาเผาที่สูงอยู่ไปเจอกับออกซิเจนในอากาศจะทำให้เกิดไฟลุกขึ้นมาอีกรอบได้ เปิดเตาเผาแล้วจะได้ถ่านชาร์จากกระดุกวัวและหมู หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เสร็จแล้ว

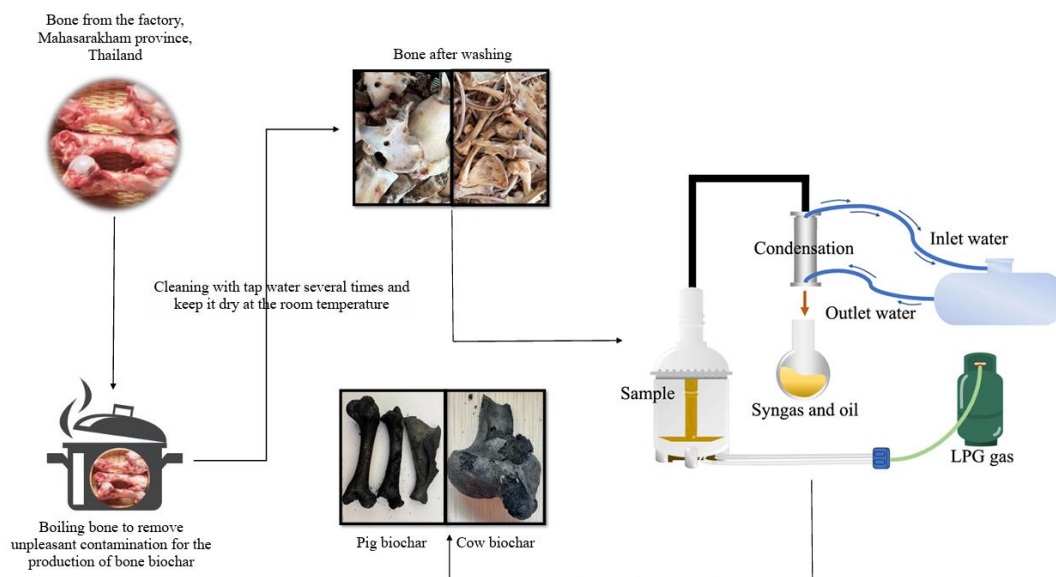
- นำถ่านไบโอชาร์จากกระดุกวัวและหมูที่ได้จากการเผามาแช่และล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดคราบเขม่าถ่านหรือเศษถ่านที่ติดถ่านไบโอชาร์วัวและหมู

- ผึ่งให้แห้งจากนั้นนำเก็บไว้ในโถสุญญากาศ

- ร่อนถ่านผ่านตะแกรกร่อนขนาดมาตรฐาน (Sieve) ขนาด 600 ไมโครเมตร

- นำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป





ภาพประกอบ 16 ภาพกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู



ภาพประกอบ 17 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process)

ที่มา : มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ



ภาพประกอบ 18 กระดูกวัวและหมูที่ตากแห้งแล้ว (ก่อนนำไปเผา)

3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar)

3.3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

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





ภาพประกอบ 19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

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

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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





ภาพประกอบ 20 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)
ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (67)

3.3.1.3 เครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียมดังนี้

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



ภาพประกอบ 21 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (68)

3.3.1.4 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายของรูพรุน ปริมาตรของรูพรุน ในแบบต่างๆด้วยวิธีให้ตัวอย่างมีการดูดซับหรือคายก๊าซ เพื่อวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน พื้นที่ผิวของผงตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของ Volumetric gas adsorption method เช่น N_2 , Ar_2 , CO_2 , H_2 และก๊าซไม่กัดกร่อนอื่น ๆ BET เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ประมาณ 0.3-0.5 กรัม สถานะของแข็ง เช่น อนุภาคผง เม็ด แผ่นฟิล์ม เป็นต้น ต้องไม่ฟุ้งกระจายมากและไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันหากเป็นตัวอย่างอัดเม็ด จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และต้องทำการอบตัวอย่างมาก่อน

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 22 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET)

ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี(69)

3.4 ความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเตรียมในสารละลายกรดที่มีค่า pH ไม่เกิน 2 ของถ่านชาร์จากกระดูกวัวและหมู หาได้จากการเปรียบเทียบปริมาณทองแดงก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านชาร์จากกระดูกวัวและหมู ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะทองแดง คำนวณจากสมการ

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ

C_0 คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L) เริ่มต้น

C_e คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L) ที่สมดุล

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

Mass คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

3.5 วิธีการทดลอง

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

3.5.1 การทดลองหาปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมูปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 g โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ที่มีความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 100 mg/L ปริมาตร 100 mL
- ทิ้งไว้ 24 hr. จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.2 การทดลองหาความเข้มข้นโลหะหนักทองแดงที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมูปริมาณ 2 g โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำไปในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 200 และ 250 mg/L โดยมีปริมาตร 100 mL
- ทิ้งไว้ 24 hr. จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.3 การทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมกับการดูดซับ

- ทำการชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมู ปริมาณ 2 g
- ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL เติมน้ำละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซิเตรทเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 100 mL
- ทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150 และ 180 min
- กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer ที่
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.4 การทดลองค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ

- เตรียมสารละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซิเตรทเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 100 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL

- ปรับค่า pH ให้อยู่ที่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 โดยใช้เครื่อง pH Meter
- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมู ปริมาณ 2 g เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL ที่เตรียมไว้
- ทิ้งไว้ 24 hr. จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.5.5 การทดลองอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมูปริมาณ 2 g โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 200 และ 250 mg/L โดยมีปริมาตร 100 mL
- ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง Water Bath
- ทิ้งไว้ 24 hr. จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1

3.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

นำผลที่ได้จากการทดลอง ข้อ 3.5.2 ไปหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่คำนวณความสามารถในการดูดซับต่อเวลา และศึกษากลไกการดูดซับด้วยสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ,ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ,ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm) ,ไอโซเทอมแบบเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm) ,ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm) และไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm)

3.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการนำผลจากการทดลอง ระยะเวลาการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ มาทำการทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ โดยใช้ผลการทดลองจาก ข้อ

3.5.3 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

3.8 เทอร์โมไดนามิกการดูดซับ (Thermodynamic)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจาก ข้อ 3.5.5 มาใช้ในการคำนวณเทอร์โมไดนามิกการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ΔG° (70) ได้จากสมการที่ (3.2)

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

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล องศาเคลวิน และ T คือ อุณหภูมิ สมบูรณ์ (องศาเคลวิน) ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS°) คำนวณได้จากค่าความชัน และจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ (70) ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

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

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)



บทที่ 4

อภิปรายผลการทดลองงานวิจัย

4.1 ลักษณะทางกายภาพของกระดุกวัวและหมูก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า

กระดุกที่นำมาจากโรงฆ่าสัตว์และร้านอาหารที่ตั้งอยู่ในบริเวณ อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม ของประเทศไทย นำกระดุกวัวและหมูมาเผาด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า กระบวนการนี้เริ่มจากนำวัตถุดิบมาทำความสะอาดด้วยน้ำประปาและทำความสะอาดจนไม่มีสิ่งติดอยู่ภายในกระดุกวัวและกระดุกหมู ตากกระดุกวัวและหมูให้แห้งด้วยอุณหภูมิห้อง ตามภาพประกอบที่ 23 หลังจากนั้น กระดุกที่ถูกทำความสะอาดจะถูกย้ายไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 60 cm และความสูง (H) 2.5 m เพื่อเผาด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า โดยทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำไปเผา 1 Kg ต่อการนำไปเผาแต่ละอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ใช้ในแต่ละรอบเท่ากับ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 hr. หลังจากเผาด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้าเสร็จในแต่ละรอบเวลาจะต้องปล่อยให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถ่านที่เตรียมไว้จะถูกบดให้กลายเป็นถ่านผงและเก็บไว้ในเครื่องดูดความชื้นเพื่อการสังเกตคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมันต่อไปได้ด้วยงานวิจัยที่ทำอย่างใกล้ชิด

ลักษณะของกระดุกวัวก่อนนำไปเผากระดุกวัวมีลักษณะเป็นชิ้นขนาดใหญ่หนา มีความแข็งสีขาว เมื่อนำไปเผาด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้าเสร็จ ลักษณะกระดุกวัวหลังจากเผาจะมีลักษณะสีดำมันวาวเกิดจากน้ำมันที่อยู่ภายในกระดุก ลักษณะเป็นถ่านทั้งชิ้น รูปร่างยังคงเป็นเหมือนกระดุกแบบก่อนเผา มีความเปราะมากขึ้น เมื่อนำมาทุบหรือบดให้เป็นผงถ่านไบโอชาร์จะมีลักษณะเป็นผงสีดำ และมีบางส่วนที่ยังคงเป็นเม็ดขนาดเล็กเนื่องจากถ่านไบโอชาร์วัวมีความแข็งทุบได้ไม่ค่อยละเอียด ส่วนลักษณะของกระดุกหมูก่อนเผาจะมีลักษณะเป็นสีขาวออกเหลือง มีขนาดความยาวเท่าฝ่ามือเป็นชิ้นไม่ใหญ่มาก มีความแข็งและค่อนข้างเหนียว เมื่อผ่านกระบวนการเผาไฟโรไลซิสแบบช้าจะมีลักษณะเป็นถ่านทั้งชิ้น มีสีดำด้าน มีความเปราะแตกง่าย สามารถทุบหรือบดได้ง่ายเนื่องจากมีความเปราะและเมื่อทุบหรือบดเสร็จแล้วเป็นผงสีดำสนิท ไม่มีสีขาวปน จากการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของกระดุกวัวและหมูก่อนเผามีลักษณะแตกต่างกันที่ขนาดของกระดุกทั้งสองชนิด ลักษณะสีของกระดุกวัวมีสีขาวส่วนกระดุกหมูมีสีขาว-เหลือง และลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์วัวและหมูมีลักษณะแตกต่างกันที่ความเป็นมันวาวของถ่านไบโอชาร์วัว ส่วนถ่านไบโอชาร์หมูจะไม่มีคามมันวาว เนื่องจากถ่านไบโอชาร์หมูมีน้ำมันในตัวกระดุกน้อยกว่าถ่านไบโอชาร์วัว แต่ทั้งนี้ถ่านไบโอชาร์วัวและหมูมีลักษณะของรูปร่างหลังจากการเผาที่เหมือนกันคือยังคงสภาพความเป็นกระดุกก่อนเผาได้อย่างเหมือนเดิม และเมื่อทำการทุบหรือบดถ่านไบโอชาร์ทั้งสองชนิด สามารถบด

ถ่านไบโอชาร์หมูได้ละเอียดกว่าถ่านไบโอชาร์วัวเนื่องจากถ่านไบโอชาร์วัวเป็นชิ้นใหญ่และมีความแข็งมากกว่าถ่านไบโอชาร์หมู



ภาพประกอบ 23 ภาพถ่ายวัตถุดิบ

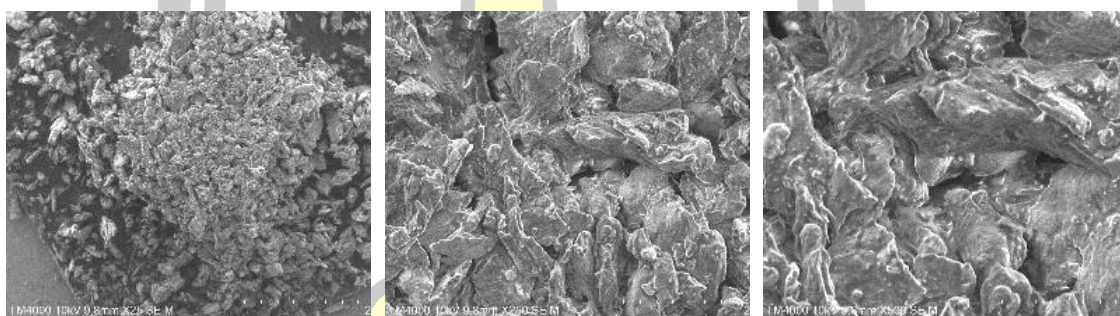
: ก) กระจุกวัว, ข) ถ่านไบโอชาร์วัว, ค) ถ่านไบโอชาร์วัวชนิดเม็ด, ง) กระจุกหมู, จ) ถ่านไบโอชาร์หมู และ ฉ) ถ่านไบโอชาร์หมูชนิดเม็ด

4.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระจุกวัวและหมู

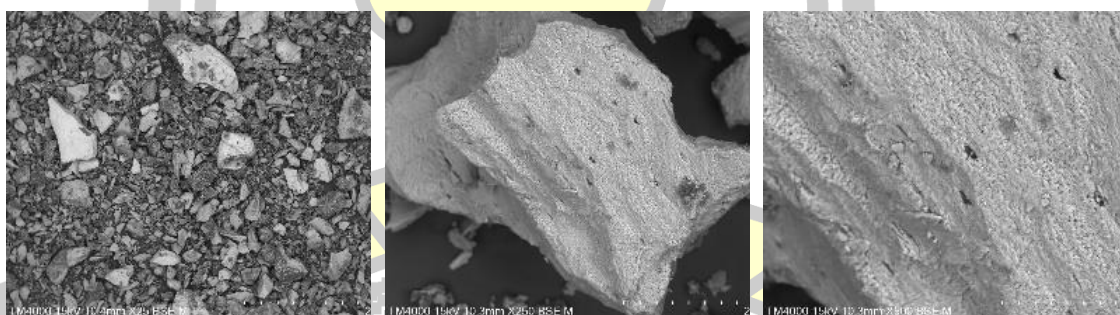
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้เพื่ออธิบายสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของวัสดุในระดับไมโครและระดับนาโน ช่วยในการศึกษา ลักษณะโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระจุกวัวและหมู จากการศึกษาภาพที่มีความละเอียดสูงของพื้นผิวถ่านไบโอชาร์วัวและหมูที่เตรียมได้ สามารถตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของ โครงสร้าง แสดงดังภาพประกอบ 24 โดยลักษณะพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์วัวก่อนเผามีลักษณะเป็นมัน วาว ไม่มีรูพรุน ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C มีลักษณะพื้นผิวเรียบ ไม่ขรุขระ เป็นมันวาว มีรูพรุนเล็กน้อย ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C มีลักษณะพื้นผิวขรุขระลักษณะเหมือนรากต้นไม้ ไม่เรียบเนียน ไม่มีความมันวาว มีรูพรุนเล็กน้อย และถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะ พื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบเนียน ไม่มีความมันวาว แต่เกิดรูพรุนเยอะขึ้นและมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น

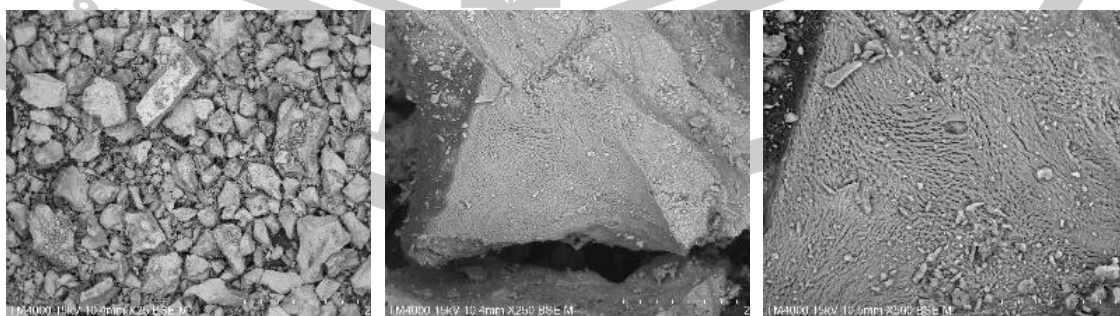
ภาพประกอบ 25 แสดงถึงพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกหมู กระดุกหมู ก่อนเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีลักษณะเป็นเส้น พื้นผิวไม่เรียบเนียนขรุขระ เป็นมันวาว มีความเหนียว ไม่มีรูพรุน ถ่านไบโอชาร์หมุที่อุณหภูมิ 300 °C และ 400 °C มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ ลักษณะเหมือนรากต้นไม้ ไม่เรียบเนียน ไม่มันวาว มีรูพรุนเล็กน้อย และถ่านไบโอชาร์หมุที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบเนียน มีรอยเส้นแตกขนาดใหญ่ ไม่มันวาว มีรูพรุนเพียงเล็กน้อย จากคำอธิบายข้างต้นแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวของวัสดุของถ่านไบโอชาร์วัวและหมูว่ามีลักษณะ พื้นผิวไม่มันวาว ไม่เรียบและมีความขรุขระ แต่ภาพเผยให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความพรุน สรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแสดงให้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนของโครงสร้างและรูพรุน ซึ่งส่งผลต่อการนำไปบำบัดมลพิษต่างๆได้ เช่น โลหะหนักแคดเมียม (71) โลหะหนักสังกะสี (72) บำบัดฟลูออไรด์ ในน้ำบาดาล (73) หรือแม้กระทั่งการนำมาปรับปรุงดิน (74)



(ก)



(ข)



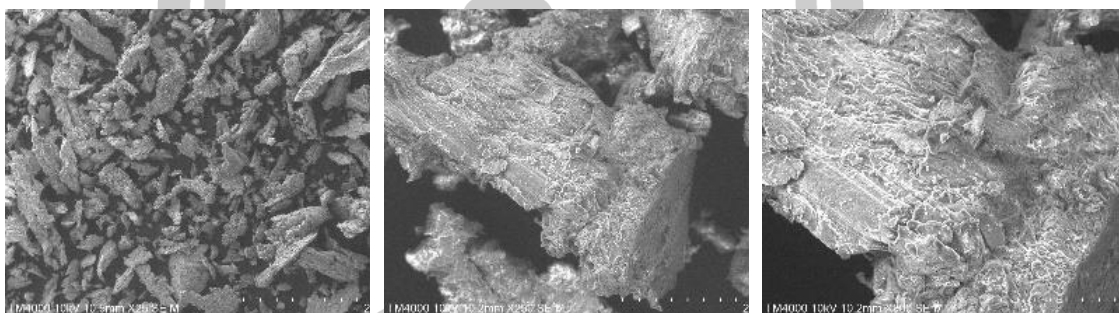
(ค)



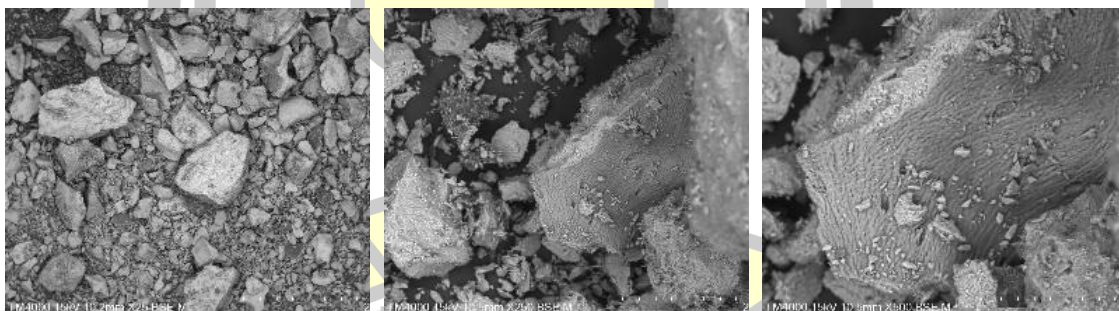
(ง)

ภาพประกอบ 24 SEM สำหรับถ่านไบโอชาร์

: ก) กระดูกวัวก่อนเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ข) ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C ค) ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C และ ง) ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 500 °C



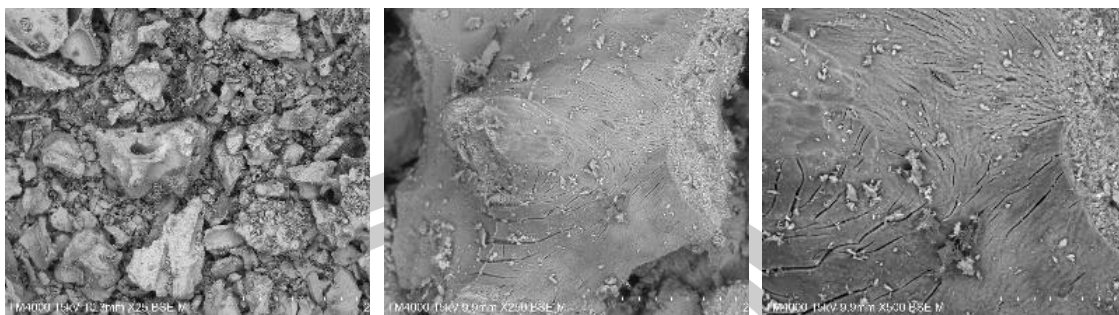
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพประกอบ 25 SEM สำหรับถ่านไบโอชาร์

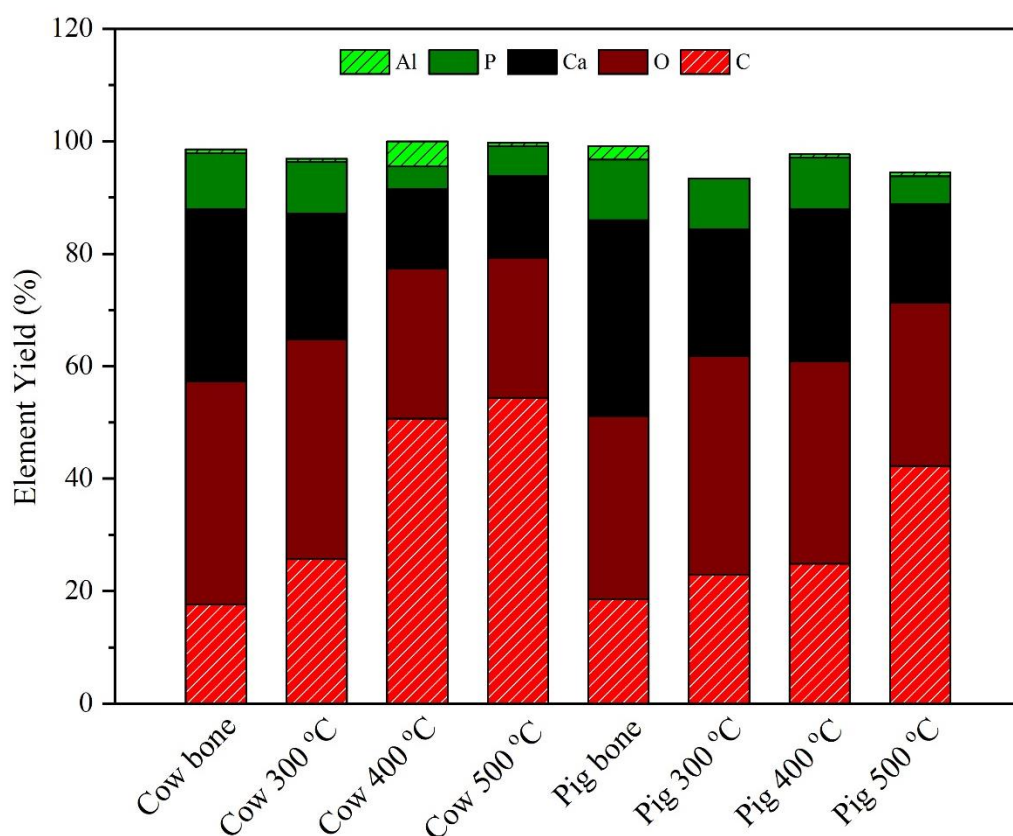
: ก) กระดูกหมูก่อนเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ข) ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C ค) ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C และ ง) ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C

4.2.2. ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Energy Dispersive X-ray (EDX)

Energy Dispersive X-ray (EDX) คือ เทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้รังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งมีการแบ่งพลังงาน (energy dispersive) เพื่อตรวจวัดสารที่อยู่ในตัวอย่าง โดยใช้การวิเคราะห์การกระจายของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนกลับมาหลังจากกระทบกับตัวอย่างนั้นๆ EDX ช่วยในการหาข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณและระบุชนิดของธาตุที่ประกอบอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งในภาพประกอบ 26 แสดงถึงปริมาณและระบุชนิดของธาตุที่อยู่ในกระดูกวัว กระดูกหมูและถ่านไบโอชาร์วัวและหมู ประกอบไปด้วยธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) อลูมิเนียม (Al) และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ซึ่งปริมาณธาตุที่อยู่ภายในกระดูกวัวมีประมาณ 17.64%, 39.73%, 30.56%, 9.96%, 0.65%, และ 1.46% ตามลำดับ ปริมาณธาตุในไบโอชาร์วัว 300 °C มีประมาณ 25.67%, 39.16%, 22.30%, 9.21%, 0.53% และ 3.13% ตามลำดับ ปริมาณธาตุในไบโอชาร์วัว 400 °C ประมาณ 50.68%, 25.75%, 14.05%, 4.07%, 4.42% และ 1.03% ตามลำดับ ปริมาณธาตุในไบโอชาร์วัว 500 °C มีประมาณ 54.35%, 24.97%, 14.46%, 5.35%, 0.56% และ 0.31% ตามลำดับ ปริมาณธาตุที่อยู่ในกระดูกหมูมีประมาณ 18.53%, 32.61%, 34.84%, 10.77%, 2.35% และ 0.9% ตามลำดับ ปริมาณธาตุในไบโอชาร์หมู 300 °C มีประมาณ 22.93%, 38.90%, 22.52%, 9.01%, 0% และ 6.64% ตามลำดับ ปริมาณธาตุในไบโอชาร์หมู 400 °C มีประมาณ 24.90%, 36.00%, 27.04%, 9.15%, 0.58% และ 2.33% ตามลำดับ และปริมาณธาตุในไบโอชาร์หมู 500 °C มีประมาณ 42.26%, 29.25%, 17.49%, 5.00%, 0.69% และ 5.31% ตามลำดับ

ปริมาณธาตุที่อยู่ภายในกระดูกวัวและหมูก่อนการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเพียงเล็กน้อย ปริมาณธาตุส่วนใหญ่ที่พบมากที่สุดภายในกระดูกวัวและหมูก่อนเผา คือ องค์ประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) และ ออกซิเจน (O) ซึ่งเป็น

องค์ประกอบหลักที่อยู่ภายในกระดูก (75) ส่วนปริมาณธาตุที่อยู่ในถ่านไบโอชาร์วู้ที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่ามีปริมาณองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) เพิ่มขึ้นจากก่อนการเผาเพียงเล็กน้อยและยังคงมีองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) และ ออกซิเจน (O) เป็นหลักอยู่ ปริมาณธาตุที่อยู่ภายในถ่านไบโอชาร์วู้ที่ อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C จะมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) สูงเป็นหลัก แต่ยังคงรักษาองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) และออกซิเจน (O) ไว้ได้อยู่ เนื่องจากใช้การเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะช่วยรักษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ภายในตัวอย่างได้ (76) เช่นเดียวกันถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C และ 400 °C จะมีองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) อยู่เป็นหลัก และองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะเป็นถ่านไบโอชาร์จากวัวหรือหมู แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของแต่ละธาตุอยู่ไม่มีธาตุใดธาตุหนึ่งหายไปเพียงแต่ปริมาณของธาตุแต่ละธาตุจะแตกต่างกันออกไปตามอุณหภูมิในการเผา โดยเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงค่าคาร์บอนในกระดูกก็จะยิ่งสูงขึ้นตาม

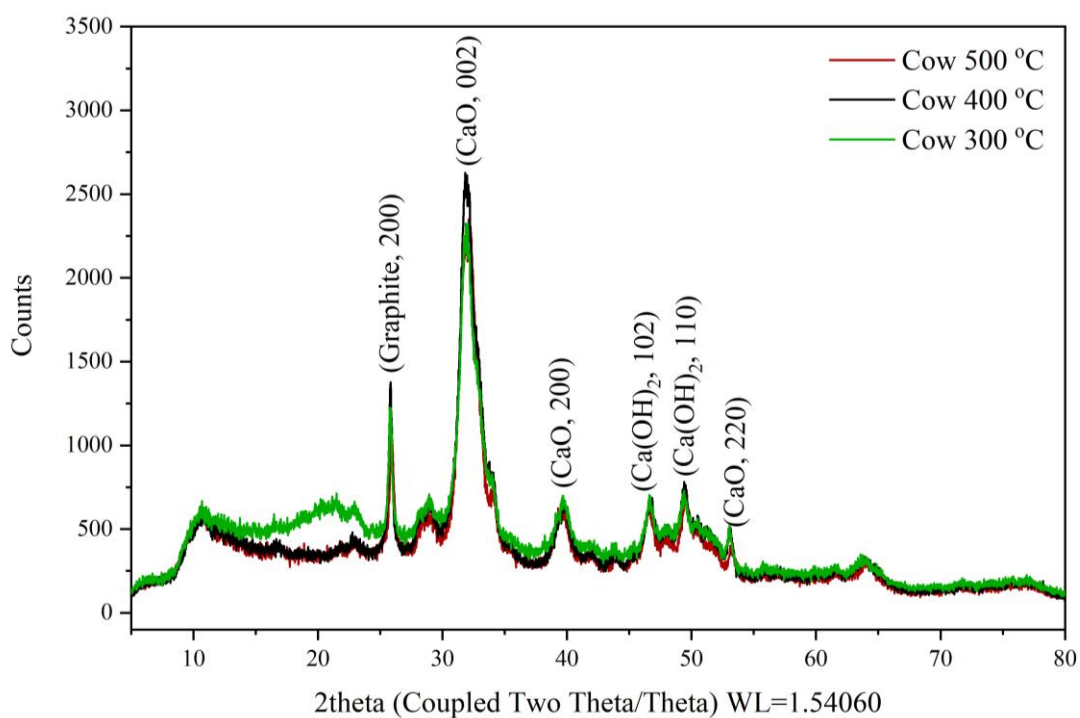


ภาพประกอบ 26 แสดงองค์ประกอบของธาตุของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยเทคนิค EDX

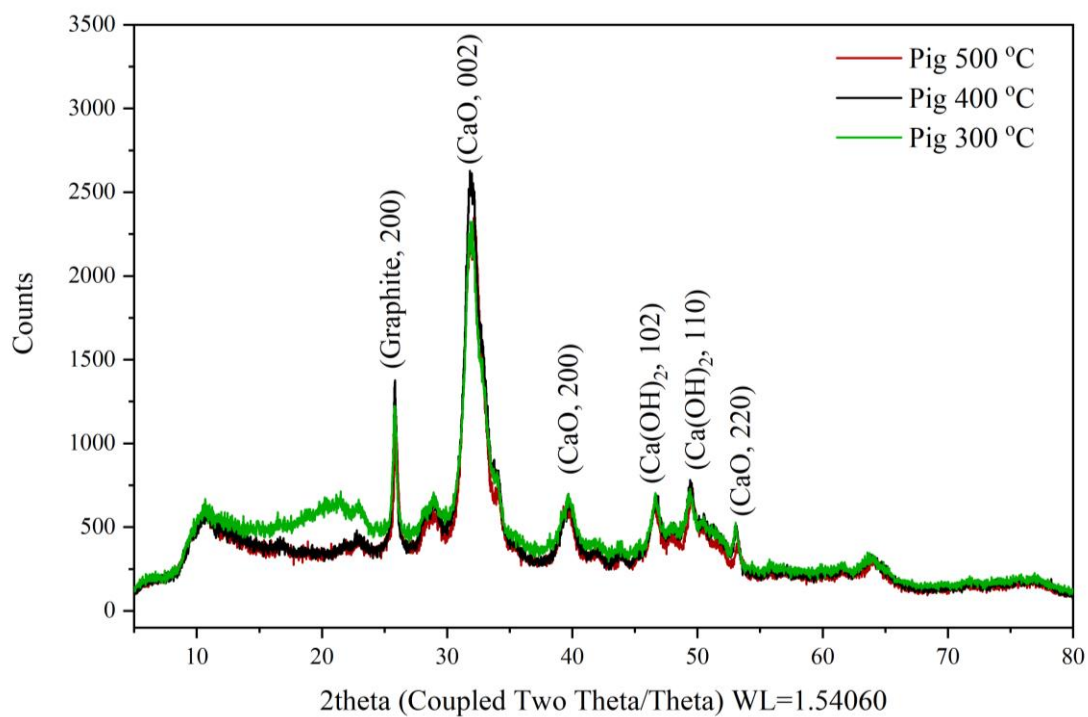
4.2.3. ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย X-Ray diffraction analysis (XRD)

X-Ray diffraction analysis (XRD) เป็นเทคนิคทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุโดยใช้รังสีเอ็กซ์ (X-rays) เพื่อช่วยในการหาโครงสร้างคริสตัลของสารต่าง ๆ รังสีเอ็กซ์จะถูกกระจายหรือสะท้อนจากอะตอมในโครงสร้างคริสตัลตามมุมที่แน่นอน และการวัดการกระจายรังสีเหล่านี้จะช่วยในการกำหนดโครงสร้างของสารตัวอย่าง ซึ่งภาพประกอบ 27 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของถ่านไบโอชาร์ของวัวที่เตรียมได้จากการบวกรวมการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่ามีจุดพีคเกิดขึ้นที่ 25.80° 31.90° 39.68° 46.55° 49.53° และ 53.05° จุดพีคที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงลักษณะการผลึกของถ่านไบโอชาร์วัว ซึ่งโครงสร้างผลึกถ่านไบโอชาร์วัวที่เกิดขึ้นมีดังนี้คล้ายกับโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ (200) โครงสร้างผลึกของ CaO (002 200 220) และโครงสร้างผลึกของ Ca(OH)_2 (102 110) ซึ่งบ่งบอกถึงธาตุหลักที่เกิดขึ้นหลังจากการบวกรวมการไพโรไลซิสแบบช้า และภาพประกอบ 28 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากการบวกรวมการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าเกิดจุดพีคที่คล้ายกันกับถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากการบวกรวมการไพโรไลซิสแบบช้า โดยมีจุดพีคดังนี้ 25.80° 31.82° 39.78° 46.55° 49.53° และ 52.97° ซึ่งแต่ละจุดบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของถ่านไบโอชาร์หมู คือมีโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ (200) โครงสร้างผลึกของ CaO (002 200 220) และโครงสร้างผลึกของ Ca(OH)_2 (102 110) จากโครงสร้างดังกล่าวพบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์ (77) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของถ่านไบโอชาร์จะมีโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ (200) และโครงสร้างผลึกของ CaO (002 200 220) (78) อยู่ภายในตัวดูดซับที่เตรียมได้





ภาพประกอบ 27 ภาพลักษณะ XRD ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

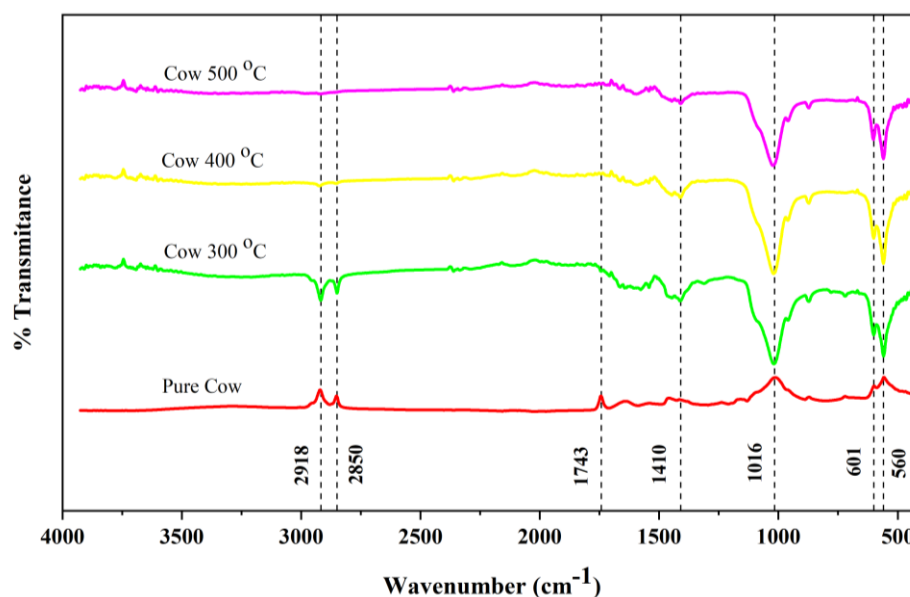


ภาพประกอบ 28 ภาพลักษณะ XRD ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

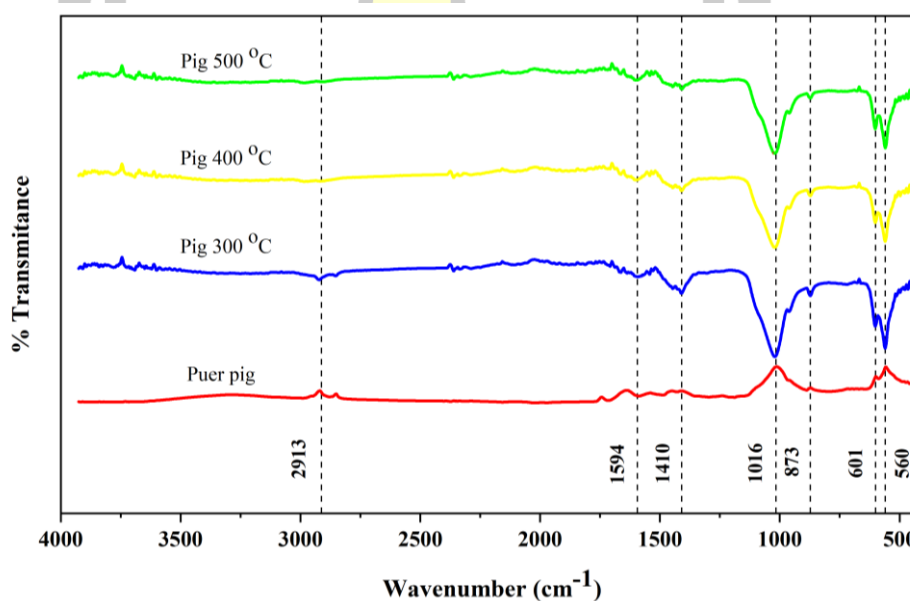
4.2.4. ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ใช้วิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชันภายในถ่านกระดูก เพื่อระบุข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของถ่านกระดูก เช่น อัลเคน แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก และสารประกอบอะโรมาติก ฟังก์ชันเหล่านี้ใช้ประเมินคุณภาพและคุณสมบัติของถ่านกระดูกเพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาซึ่งสเปกตรัม FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากวัช โดยแสดงอยู่ใน ภาพประกอบ 29 สเปกตรัม FTIR ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส แสดงแถบการดูดกลืนแสงที่กว้างระหว่าง 2,500 ถึง 3,300 cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงการสั่นสะเทือนที่ยืดออกของพันธะ O-H และ C-H ของกรดคาร์บอกซิลิก และหมู่แอลเคน และที่ 2,918 และ 2,850 cm^{-1} ปรากฏพีกที่ 1,743 cm^{-1} มาจากกลุ่มการยืด C=O จุดสูงสุดที่ประมาณ 1,410 ถึง 1,420 cm^{-1} บ่งบอกว่ามีหมู่พันธะคู่ เช่น =CH-H ในขณะที่พีกประมาณ 1,016-1250 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืด C-N ของกลุ่มฟังก์ชันเอมีนที่ 1,016 cm^{-1} และสเปกตรัม FTIR ของกระดูกวัชก่อนการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าพบว่าไม่มีจุดพีกที่แสดงถึงพันธะที่เกิดขึ้น

สเปกตรัม FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู แสดงดังภาพประกอบ 30 มีจุดสูงสุดที่ของพีกที่ชัดเจนระหว่าง 2,500 ถึง 3,300 cm^{-1} จุดสูงสุดที่ 2,913 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการสั่นสะเทือนแบบยืดออก O-H ของกลุ่มคาร์บอกซิลิก ช่วงตั้งแต่ 1,650 ถึง 1,590 cm^{-1} บ่งบอกถึงการโค้งงอซึ่งมีลักษณะในกลุ่มเอมีน เช่น N-H ที่มีอยู่ จุดสูงสุดที่ 1,410 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืด =CH-H ของกลุ่มการสั่นสะเทือนแบบยืด O-H ในขณะที่จุดสูงสุดประมาณ 1,016-1,250 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดออกของ C-N ของกลุ่มฟังก์ชันเอมีน และที่ 1,016 cm^{-1} และจุดสูงสุดที่ 873 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการสั่นสะเทือนแบบยืดออกของ C-H ของกลุ่ม 1,2,4-trisubstituted และ 1,3-disubstituted และสเปกตรัม FTIR ของกระดูกหมูก่อนการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าพบว่าไม่มีจุดพีกที่แสดงถึงพันธะที่เกิดขึ้น จากพันธะที่เกิดขึ้นของถ่านไบโอชาร์วัชและหมูค่อนข้างเกิดพันธะในพีกเดียวกันสามารถบอกได้ว่า ลักษณะของพันธะที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นพันธะของกรดคาร์บอกซิลิก, หมู่แอลเคน, กลุ่มฟังก์ชันเอมีน, แสดงให้เห็นถึงลักษณะพันธะที่เป็นถ่านไบโอชาร์ (79) โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการดูดซับมลพิษทางน้ำได้ เช่น ดูดซับโลหะหนักแคดเมียม (71) ดูดซับเตตราไซคลีนที่ปนเปื้อนในน้ำ (80) ดูดซับโลหะหนักสังกะสี (Zn^{2+}) (72) และดูดซับโลหะหนักตะกั่ว (81) เป็นต้น



ภาพประกอบ 29 ลักษณะ FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว



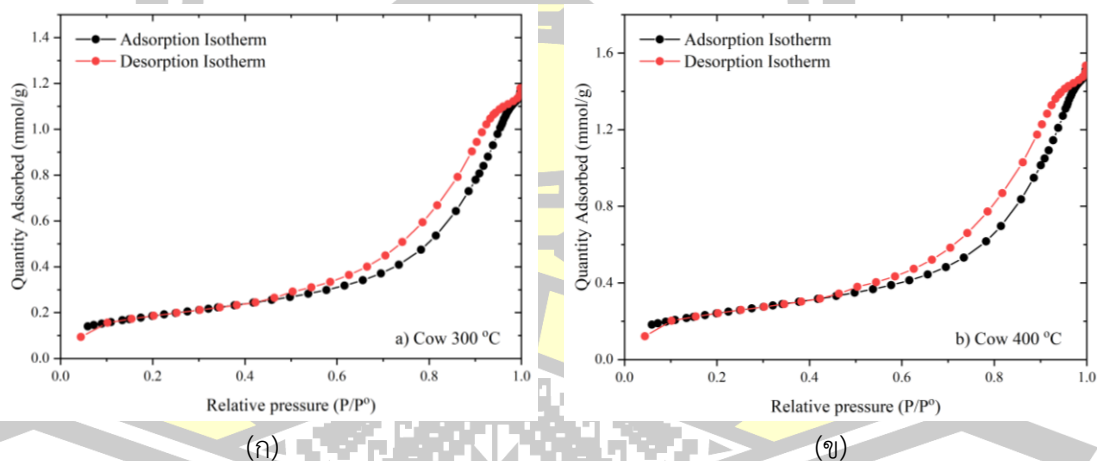
ภาพประกอบ 30 ลักษณะ FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู

4.2.5. ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Surface area and porosity analyzer (BET)

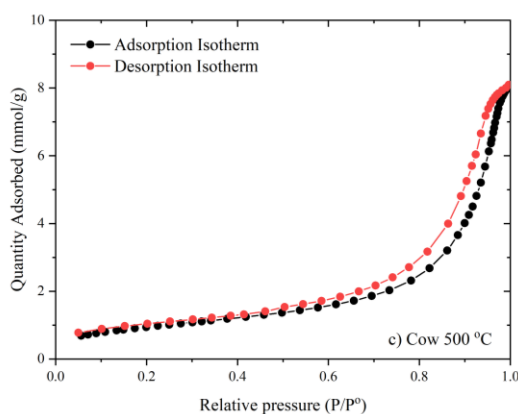
เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) ใช้วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและบอกถึงลักษณะไอโซเทอรั่มการดูดซับไนโตรเจนของตัวอย่างได้

4.2.5.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับมักใช้เพื่อระบุลักษณะความพรุนและพื้นที่ผิวของวัสดุ รวมถึงถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู ไอโซเทอร์มเหล่านี้ให้ข้อมูลศึกษากับพฤติกรรมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูที่มีความดันต่างกัน ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนสามารถใช้เป็นตัวกำหนด พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายตัวขนาดรูพรุน โดยทั่วไปการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนจะดำเนินการโดยใช้ทฤษฎีรูนาเออร์-เอมเมตต์-เทลเลอร์ (BET) จากการศึกษาภาพประกอบ 31 พบว่าไอโซเทอร์มของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 300 °C ที่อุณหภูมิ 400 °C และ ที่อุณหภูมิ 500 °C แสดงไอโซเทอร์ม type III โดยสันนิษฐานว่าการดูดซับมีลักษณะหลัก ๆ ของกระบวนการดูดซับนั้นคือความร้อนของกระบวนการดูดซับน้อยกว่าความร้อนของการเปลี่ยนรูปของสารละลายของสารที่ถูกดูดซับ ดังนั้นเมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากสารดูดซับสามารถมีปฏิกิริยากับชั้นดูดซับที่ถูกซับไว้มากกว่าการปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นแบบ multilayer และพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน



พูน ปณ ทิโต ชีเว



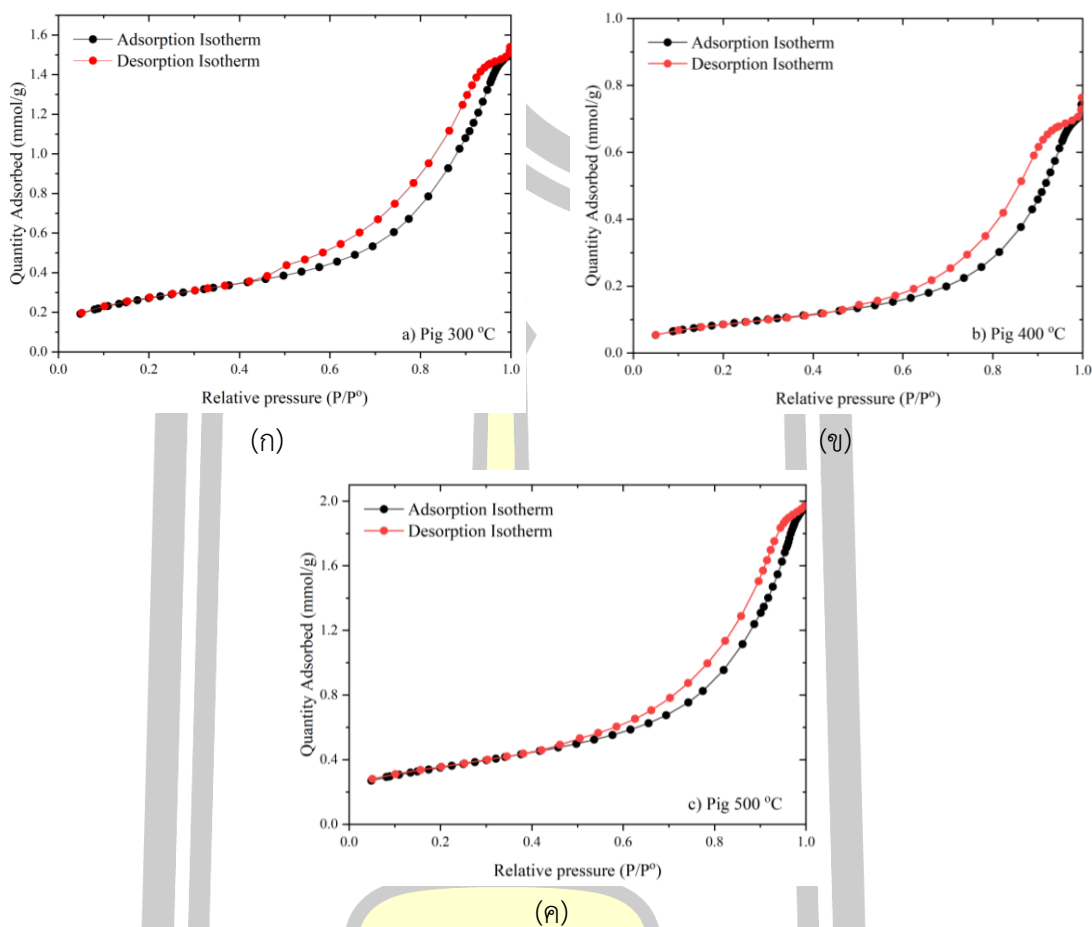
(ค)

ภาพประกอบ 31 ไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์วัวจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

: ก) ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 500 °C

จากการศึกษา ภาพประกอบ 32 พบว่าไอโซเทอรัมของถ่านไบโอชาร์หมูที่เตรียมได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C แสดงลักษณะไอโซเทอรัมของ type III เช่นเดียวกับถ่านไบโอชาร์วัว เนื่องจากมีลักษณะของกราฟที่คล้ายกันและสามารถอธิบายได้ว่า ไอโซเทอรัม type III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ type II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (Convex) จากแกน P/P_0 (51) เป็นลักษณะของไอโซเทอรัมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีลักษณะคล้ายกระเจกั่ว และมักเกิดจากการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เช่น ของแข็งที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็ก การดูดซับนี้มักจะเป็นแบบชั้นเดียวและความดันสัมพัทธ์ต่ำ (82) แต่เมื่อมีการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกัน ซึ่งจะทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้นตามความสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงขึ้น

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 32 ไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์หมู่จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า
: ก) ถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ถ่านไบโอชาร์วู้ที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 500 °C

4.2.5.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู

พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกระดูกที่ได้ศึกษาได้จากวิธี BET จาก ตารางที่ 4 อธิบายได้ว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมูมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่อุณหภูมิ 300 °C ประมาณ 14.9827 และ 19.4775 m²/g ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 400 °C ประมาณ 21.9863 และ 27.6782 m²/g ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 77.306 และ 77.0285 m²/g ตามลำดับ อีกทั้งถ่านไบโอชาร์วู้และหมูก็มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 – 15 นาโนเมตร เป็นรูพรุนชนิด mesoporous ซึ่งบ่งชี้ว่ามีรูพรุนโดยเฉลี่ยในธรรมชาติ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้นสูงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนโดยเฉลี่ยสามารถเพิ่มขึ้น

ได้ง่ายๆ โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงขึ้น และเวลาในการทดลองนานขึ้น นอกจากนี้คุณสมบัติทางเคมีของถ่านไบโอชาร์วีวและหมูสามารถปรับเปลี่ยนหรือปรับแต่งได้โดยใช้เทคนิคการผลิตต่างๆ และตัวเลือกวัตถุดิบเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะและความต้องการด้านสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมู

อุณหภูมิ	ถ่านไบโอชาร์วีว			ถ่านไบโอชาร์หมู		
	300 °C	400 °C	500 °C	300 °C	400 °C	500 °C
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	14.9827	21.9863	77.306	19.4775	27.6782	77.029
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	0.0246	0.03957	0.05177	0.2782	0.05144	0.6777
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (nm)	9.4202	10.5653	13.509	9.7940	10.5653	14.451

4.2.6. ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วย CHNS

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วย CHNS ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C จากตารางที่ 5 พบว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว ที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนอยู่ 10.254% 13.618% และ 22.674% ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนอยู่ 4.816% 2.300% และ 1.764% ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนอยู่ 2.565% 1.476% และ 1.316% ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์ของซัลเฟอร์มักจะไม่มีพบธาตุซัลเฟอร์ในถ่านไบโอชาร์วีวหรืออาจพบเพียงเล็กน้อย

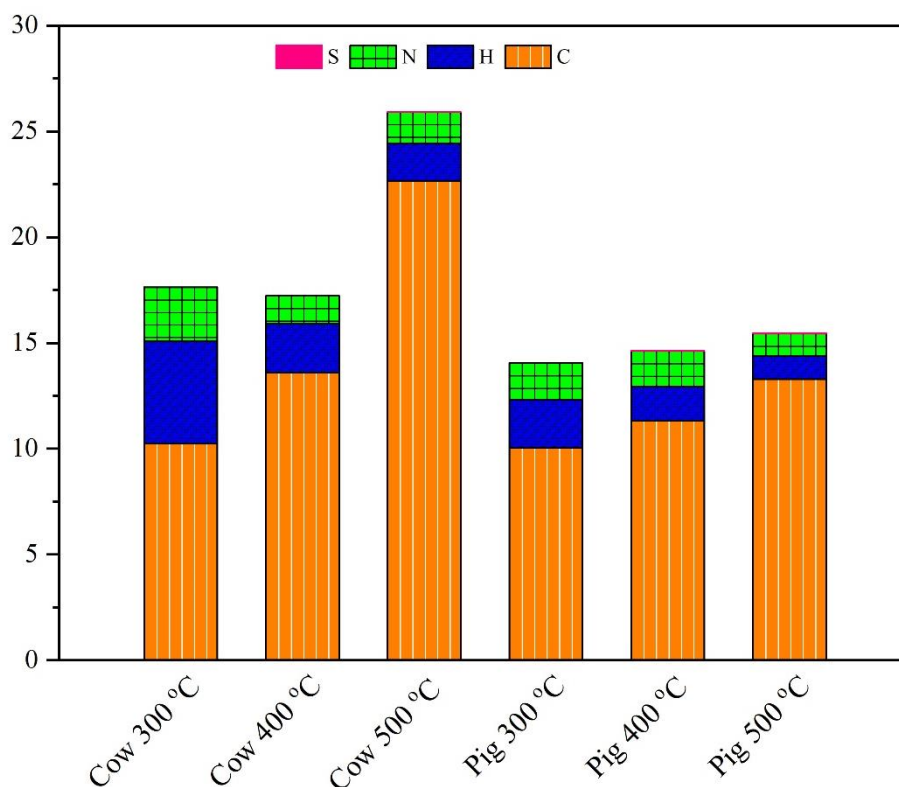
ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู ที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบองค์ประกอบของคาร์บอนอยู่ 10.053% 11.330% และ 13.286% ตามลำดับ มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน 2.256% 1.606% และ 1.104% ตามลำดับ มีองค์ประกอบของไนโตรเจนอยู่ 1.734% 1.682% และ 1.064% ตามลำดับ และเช่นเดียวกันองค์ประกอบของซัลเฟอร์ในถ่านไบโอชาร์หมูมีพบเพียงเล็กน้อยหรืออาจจะไม่พบเลย จากภาพประกอบ 33 สามารถบอกได้ว่าถ่านไบโอชาร์วีวมีองค์ประกอบของคาร์บอนมากที่สุดที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนถึง 22% นอกจากนี้ยังพบปริมาณซัลเฟอร์เกิดขึ้นเพียง 0.008% แต่ในทางกลับกันถ่านไบโอชาร์วีวที่อุณหภูมิ 500 °C พบปริมาณไฮโดรเจนและไนโตรเจนลดลง และถ่านไบโอชาร์หมูพบว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งที่อุณหภูมิ 500 °C พบปริมาณคาร์บอนมากที่สุดคือ 13% และพบว่ามีปริมาณซัลเฟอร์เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยอีกทั้งยังมีปริมาณไฮโดรเจนและไนโตรเจนลดลงเช่นเดียวกับถ่านไบโอชาร์เร็ว ถ่านไบโอชาร์เร็วจะมีปริมาณคาร์บอนมากกว่าถ่านไบโอชาร์หยาบซึ่งจะต่างกันถึง 7% แต่ปริมาณของธาตุไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์จะมีปริมาณใกล้เคียงกันไม่ต่างกันมาก สามารถสรุปได้ว่าถ่านไบโอชาร์ทั้งสองชนิดมีปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้นมากที่สุดเนื่องจากเกิดจากการเผาและอุณหภูมิมีผลต่อลักษณะทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นปริมาณของคาร์บอนภายในถ่านไบโอชาร์ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5 แสดงค่าองค์ประกอบของธาตุ CHNS ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกข้าวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

วัสดุดูดซับ	คาร์บอน (C) (% Wt)	ไฮโดรเจน (H) (% Wt)	ไนโตรเจน (N) (% Wt)	ซัลเฟอร์ (S) (% Wt)
ถ่านไบโอชาร์เร็ว 300 °C	10.254	4.816	2.565	N.D.
ถ่านไบโอชาร์เร็ว 400 °C	13.618	2.300	1.476	N.D.
ถ่านไบโอชาร์เร็ว 500 °C	22.674	1.764	1.316	0.008
ถ่านไบโอชาร์หยาบ 300 °C	10.053	2.256	1.734	N.D.
ถ่านไบโอชาร์หยาบ 400 °C	11.330	1.606	1.682	0.011
ถ่านไบโอชาร์หยาบ 500 °C	13.286	1.104	1.064	0.004

พูน ปณ จิต ชีเว

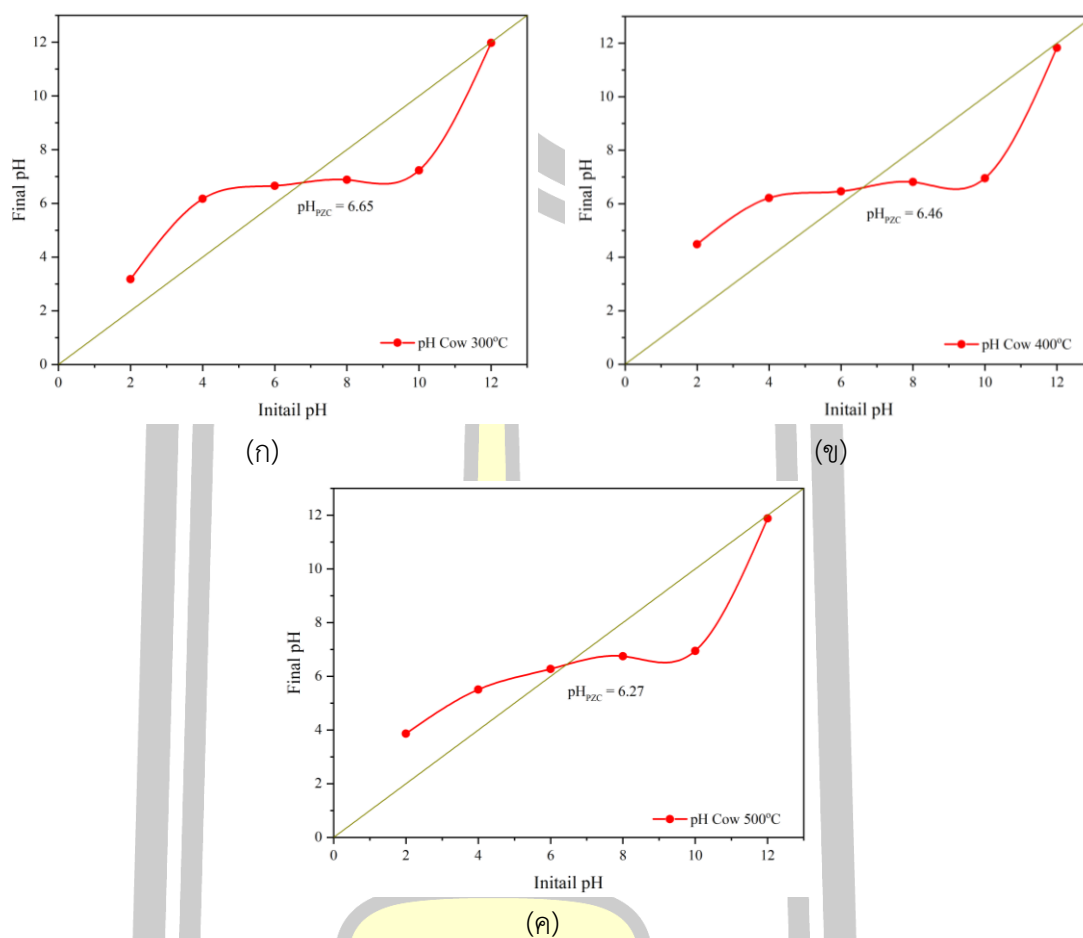


ภาพประกอบ 33 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู

4.3 ลักษณะการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและกระดูกหมู

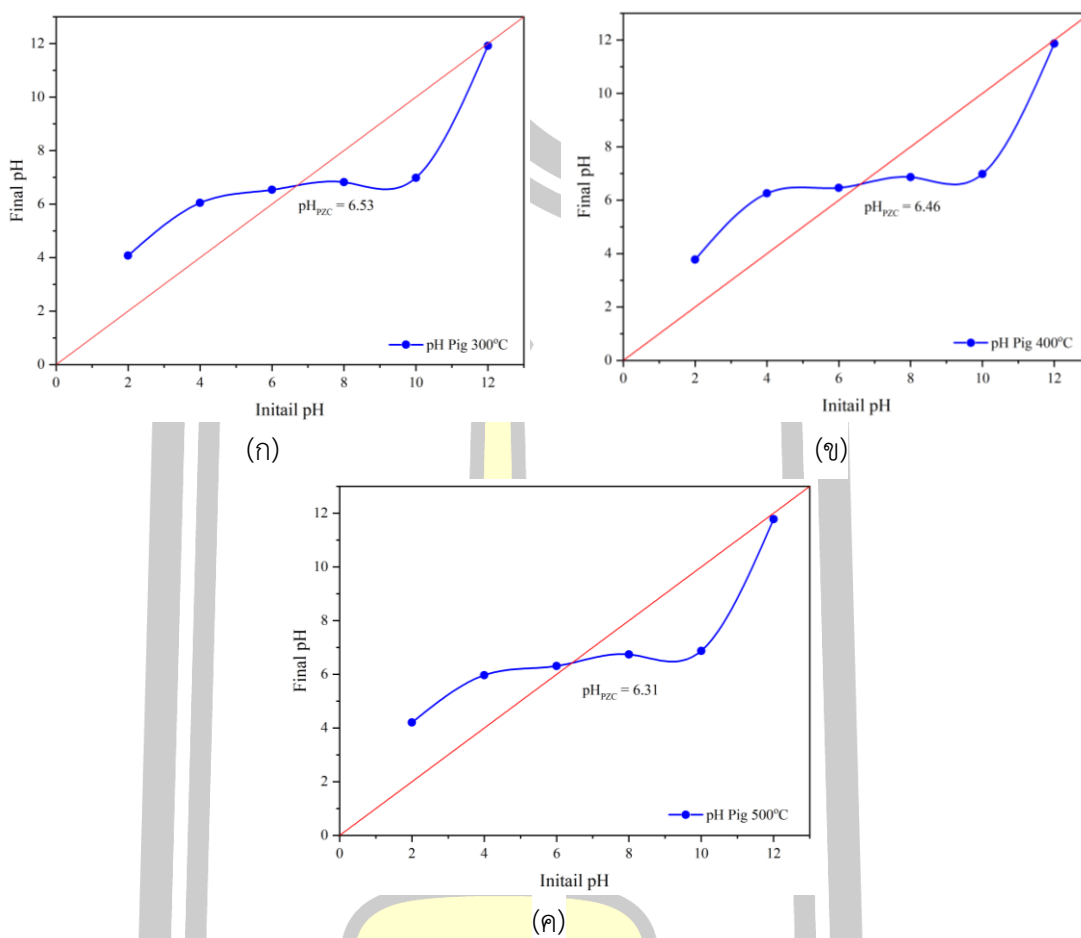
4.3.1 ผลการศึกษา Point of zero charge (pH_{pzc})

Point of zero charge (pH_{pzc}) คือค่าที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับหากค่า $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ ประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ ผลการทดลองวิเคราะห์ค่า Point of zero charge (pH_{pzc}) จากกระบวนการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์วัว พบว่าค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่าเท่ากับ 6.65 6.46 และ 6.27 ตามลำดับ ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วัวหลังจากการดูดซับทองแล้วสังเกตได้ว่า ผลของ Point of zero charge ทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงผล Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระต๊ากว : ก) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วุ้นที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วุ้นที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วุ้นที่อุณหภูมิ 500 °C

ผลการศึกษาวิเคราะห์ค่า Point of zero charge (pH_{pzc}) การดูดซับโลหะหนัก ทองแดงของถ่านไบโอชาร์วุ้นที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.53 6.46 และ 6.31 ตามลำดับ ซึ่งค่า Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์วุ้นมีความใกล้เคียงกันทั้ง 3 อุณหภูมิ



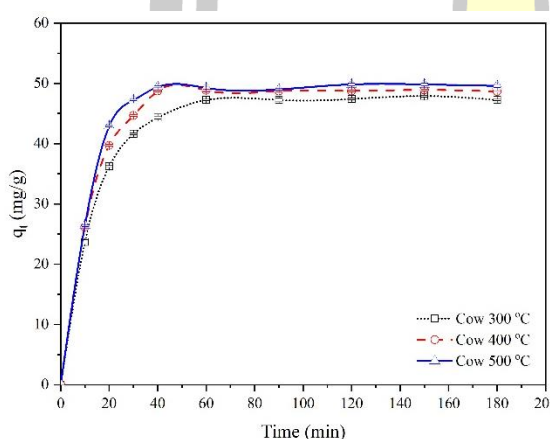
ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงผล Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู : ก) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C

4.3.2. ผลการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

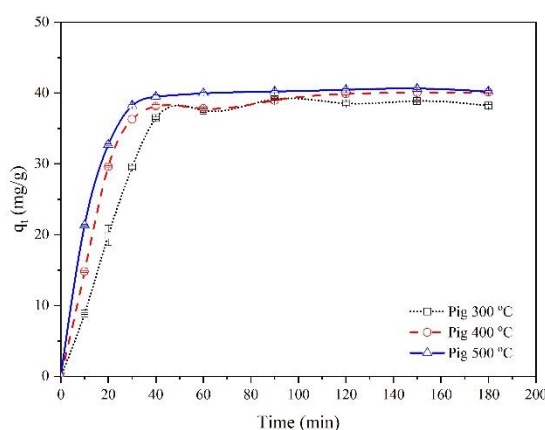
จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า จากภาพประกอบ 36 แสดงถึงระยะเวลาในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์วัวและหมูทั้ง 3 อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C จากภาพประกอบ 36 ก) แสดงถึงระยะเวลาในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์จากวัว ในช่วงเวลาที่ 0-60 นาที สามารถดูดซับทองแดงที่สภาวะสมดุลได้ประมาณ 45-50 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ช่วงเวลาหลังจาก 60-180 นาที จะสังเกตได้ว่าความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่ นั่นหมายถึง ระยะเวลา 60 นาที เป็นระยะเวลาที่เริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว และจากภาพประกอบ 36 ข) แสดงถึงระยะเวลาในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่

เตรียมได้จากกระดูกหมูนั้น ในช่วงนาที่ที่ 0-40 สามารถดูดซับทองแดงได้ประมาณ 35-40 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ช่วงเวลาที่ 40-180 นาที่ ความสามารถในการดูดซับจะเริ่มคงที่ แสดงถึงในเวลา 40 นาที่ เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับโลหะหนักทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

จากคำอธิบายข้างต้นถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงเวลา 60 นาที่ ซึ่งจะสามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ถึง 50 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงเวลา 40 นาที่ ซึ่งสามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ถึง 40 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถสรุปได้ว่าถ่านไบโอชาร์วัวจะมีสภาวะสมดุลนานกว่าถ่านไบโอชาร์หมูประมาณ 20 นาที่ แต่ทั้งนี้ถ่านไบโอชาร์วัวจะสามารถกำจัดโลหะหนักทองแดงได้มากกว่าถ่านไบโอชาร์หมูประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร หรือคิดเป็น 33.33 เปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกัน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับทองแดง

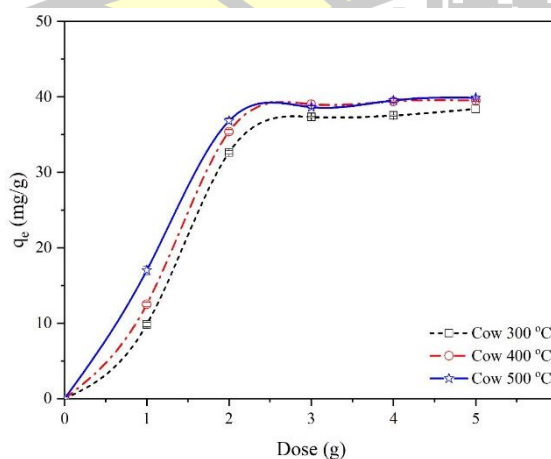
: ก) ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับถ่านไบโอชาร์วัว และ ข) ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับถ่านไบโอชาร์หมู

4.3.3. ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

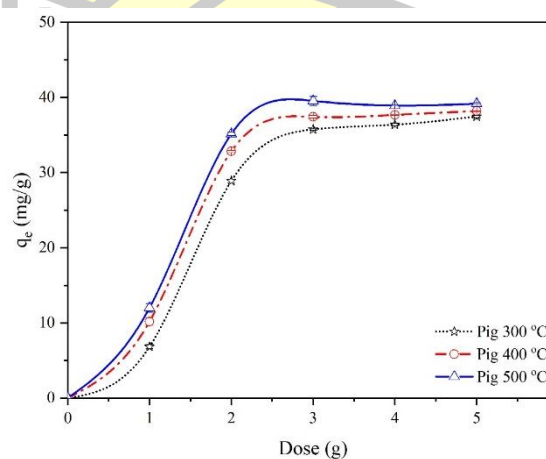
จากการทดลองการหาปริมาณตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าถ่านไบโอชาร์วัวแสดงดังภาพประกอบ 37 ก) ที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ 1 2 3 4 และ 5 กรัม จะมีค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงเท่ากับ 9.83 32.65 37.36 37.54 และ 38.42 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ 1 2 3 4 และ 5 กรัม พบว่ามีค่า

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงเท่ากับ 12.50 35.41 39.03 39.42 และ 39.52 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ 1 2 3 4 และ 5 กรัม พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวเท่ากับ 17.02 36.83 39.53 39.55 และ 39.89 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ จากคำอธิบายข้างต้นสามารถบอกได้ว่าถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบว่าตัวดูดซับในปริมาณที่ 2 กรัม ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงดีขึ้นและค่อนข้างคงที่

ภาพประกอบ 37 ข) แสดงถึงปริมาณตัวดูดซับโลหะหนักทองแดงด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบว่าถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C มีตัวดูดซับในปริมาณ 1 2 3 4 และ 5 กรัม มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงเท่า 6.82 28.89 35.74 36.37 และ 37.45 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C โดยมีตัวดูดซับปริมาณ 1 2 3 4 และ 5 กรัม มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงเท่ากับ 10.16 32.82 37.42 37.67 และ 38.19 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 °C พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงเท่ากับ 12.00 35.16 38.20 38.92 และ 39.16 มิลลิกรัม/ลิตร จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายผลได้ว่าถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C ได้ว่าตัวดูดซับในปริมาณที่ 2 กรัม มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ดีและเริ่มเข้าสู่จุดสมดุล จากการศึกษาปริมาณตัวดูดซับโลหะหนักทองแดงจากถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าค่าความสามารถของถ่านไบโอชาร์วัวและหมูมีความสามารถในการดูดซับที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าถ่านไบโอชาร์วัวและหมูเหมาะสมกับตัวดูดซับในปริมาณที่ 2 กรัมสำหรับการดูดซับที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ก)



(ข)

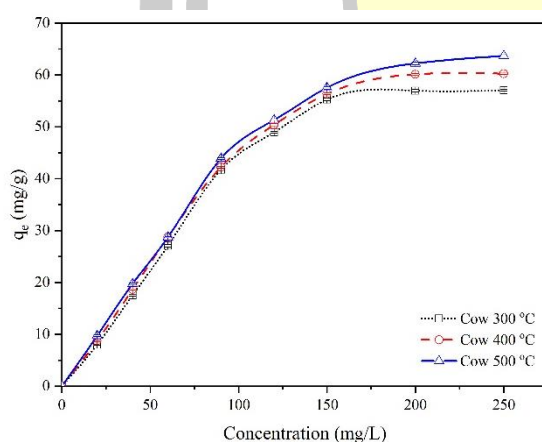
ภาพประกอบ 37 ภาพแสดงปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู : ก) ปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C และ ข) ปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

4.3.4. ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

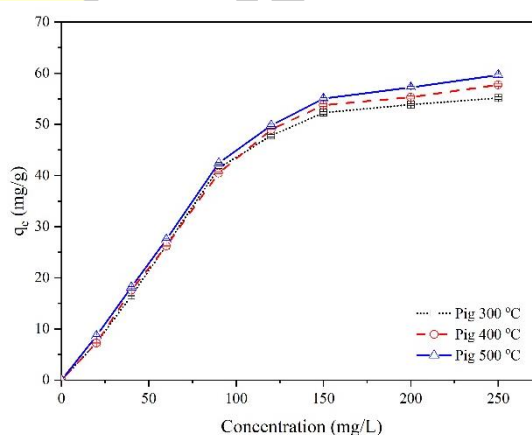
ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C ภาพประกอบ 38 ก) แสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ประสิทธิภาพในการดูดซับในช่วงความเข้มข้นที่ 0-200 มิลลิกรัม/ลิตร มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยสามารถเพิ่มขึ้นจาก 7-56 มิลลิกรัม/กรัม หลังจากผ่านความเข้มข้นช่วงนี้ไปจะสังเกตได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สมดุลที่ช่วงความเข้มข้นที่ 200-250 มิลลิกรัม/กรัม และสามารถดูดซับได้ถึง 57 มิลลิกรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 400 °C ที่ช่วงความเข้มข้นที่ 0-200 มิลลิกรัม/ลิตร มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับช่วงอุณหภูมิที่ 300 °C ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นจาก 8-60 มิลลิกรัม/กรัม เมื่อผ่านช่วงความเข้มข้นนี้ไปจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงจะเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลในช่วงความเข้มข้นที่ 200-250 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีความสามารถดูดซับอยู่ที่ 60 มิลลิกรัม/กรัม และอุณหภูมิที่ 500 °C ประสิทธิภาพในการดูดซับจะคล้ายกันกับช่วงอุณหภูมิที่ 300 °C และ 400 °C แต่แตกต่างกันที่ ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งที่อุณหภูมิ 500 °C สามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงในช่วง 0-200 มิลลิกรัม/ลิตร ได้เพิ่มขึ้นจาก 9-62 มิลลิกรัม/กรัม และช่วงความเข้มข้นที่ 200-250 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ถึง 63 มิลลิกรัม/กรัม สามารถบอกได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ใกล้เคียงกันแต่ที่อุณหภูมิ 500 °C มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงได้มากที่สุดซึ่งสามารถดูดซับได้ถึง 63 มิลลิกรัม/กรัม ทั้งนี้ยังบอกได้ว่าความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลในช่วงความเข้มข้นที่ 200 มิลลิกรัม/ลิตร ในทุกช่วงอุณหภูมิ

ภาพประกอบ 38 ข) ภาพแสดงประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ในช่วงความเข้มข้นที่ 0-200 มิลลิกรัม/ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทองแดงได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 7-53 มิลลิกรัม/กรัม และช่วงความเข้มข้นที่

200-250 มิลลิกรัม/ลิตร จะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลซึ่งสามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ 55 มิลลิกรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 400 °C มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงความเข้มข้น 0-200 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสามารถดูดซับได้จาก 7-55 มิลลิกรัม/กรัม และเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สมดุลในช่วงความเข้มข้นที่ 200-250 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ถึง 57 มิลลิกรัม/กรัม และที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ช่วงความเข้มข้น 0-200 มิลลิกรัม/ลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 8-57 มิลลิกรัม/กรัมและเข้าสู่สมดุลในช่วงความเข้มข้นที่ 200-250 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ 59 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งบอกได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ มีประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 500 °C จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดซึ่งสามารถดูดซับได้ถึง 59 มิลลิกรัม/ลิตร และในทุกช่วงอุณหภูมิจะเข้าสู่สมดุลในการดูดซับช่วงความเข้มข้นเดียวกันคือ 200 มิลลิกรัม/ลิตร จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า สามารถสรุปได้ว่าถ่านไบโอชาร์วัวมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ดีกว่าถ่านไบโอชาร์หมู และถ่านไบโอชาร์วัวและหมูจะเริ่มเข้าสู่สมดุลในช่วงความเข้มข้นเดียวกันคือช่วงความเข้มข้นที่ 200 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถอธิบายอีกนัยได้ว่าที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับที่เตรียมได้ต่อ 2 กรัม



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 38 ภาพแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

: ก) ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C และ ข) ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

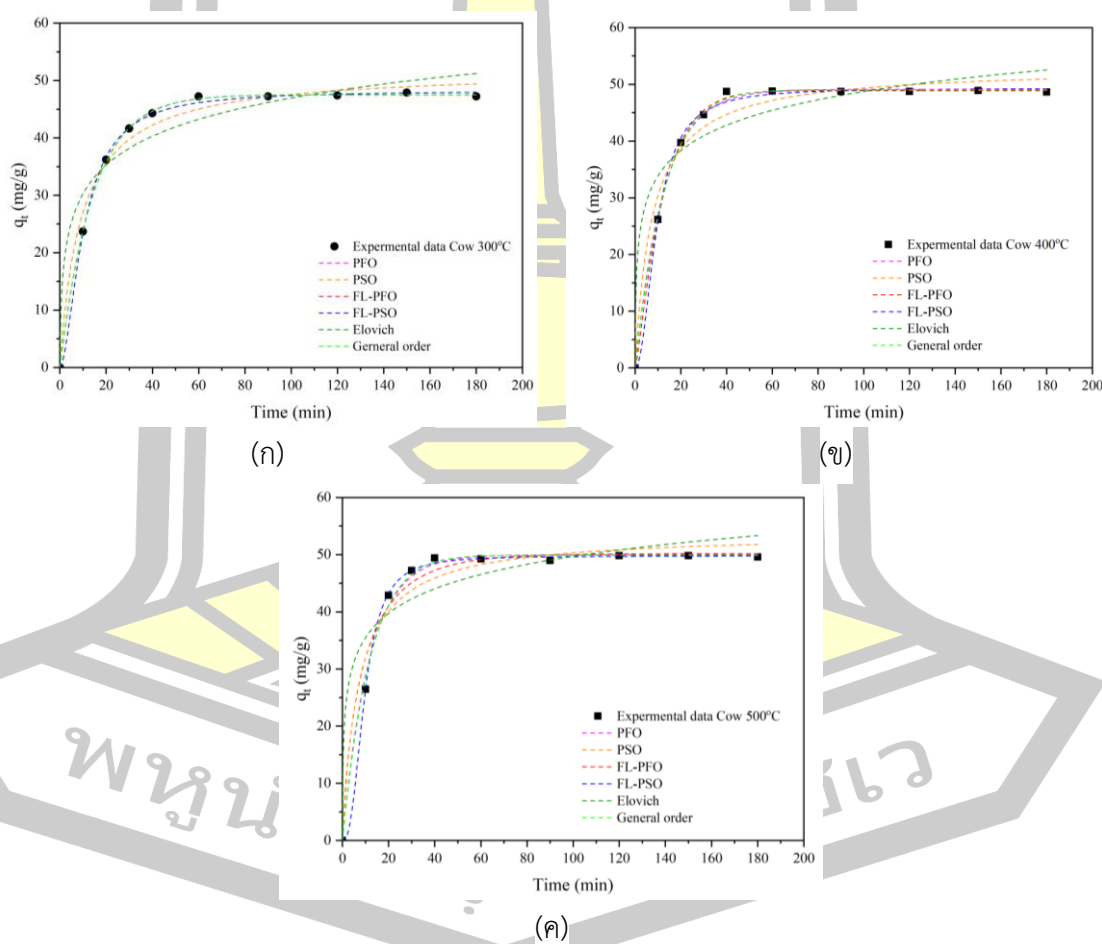
4.3.5. ผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic adsorption)

การศึกษาแบบจำลองการดูดซับจลนพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู ได้ทำการศึกษแบบจำลองการดูดซับจลนพลศาสตร์ทั้งหมด 6 แบบจำลองดังนี้ แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), แบบจำลอง Elovich , แบบจำลอง Fractal-like pseudo first order model (FLPFO), แบบจำลอง Fractal-like pseudo second order (FLPSO) และแบบจำลอง General order เพื่อศึกษากลไกการดูดซับทองแดง

ภาพประกอบ 39 ก) แสดงถึงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C จากการศึกษาถ่านไบโอชาร์วัวมีลักษณะกราฟสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) โดยจะพิจารณาจากตารางที่ 6 โดยตารางแสดงค่าพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์วัว พบว่าถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่า adjusted R-squared เท่ากับ 0.9996 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.0992) Res. sum of squ. (0.7936) ซึ่งมีค่าความสำคัญทางสถิติต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่น ๆ จึงสามารถอธิบายได้ว่าถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C สอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ซึ่งแสดงความสามารถในการดูดซับมีเท่ากับ 47.52 mg/g ซึ่งแบบจำลองนี้มีลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งจะเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะแปรผันไปตามเวลาของการดูดซับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับในระบบที่ซับซ้อนได้ (complexed system) (83)

ภาพประกอบ 39 ข) แสดงถึงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C จากการศึกษาลักษณะกราฟมีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Fractal-like pseudo first order model (FL-PFO) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบซับซ้อนผิวแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (84) โดยจะพิจารณาจากตารางที่ 6 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์พบว่าถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่า adjusted R-squared เท่ากับ 0.9989 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.2674) Res. sum of squ. (1.8719) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่น ๆ จึงสามารถอธิบายได้ว่าถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C สอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo first order model (FL-PFO) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 48.89 mg/g

ภาพประกอบ 39 ค) แสดงถึงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 °C จากการศึกษาพบว่าถ่านไบโอชาร์วู้ที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะกราฟสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ General (rational) order โดยพิจารณาจากตารางที่ 6 บอกถึงค่า R-Squared ของถ่านไบโอชาร์วู้ที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งมีค่า adjusted R-squared เท่ากับ 0.9949 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (1.3419) Res. sum of squ. (9.3934) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่น ๆ จึงสามารถอธิบายได้ว่าถ่านไบโอชาร์วู้ที่อุณหภูมิ 500 °C สอดคล้องกับแบบจำลอง General (rational) order ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 49.88 mg/g ซึ่งแบบจำลองนี้แสดงถึงกลไกการดูดซับที่มีรายละเอียดมากขึ้นระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับ เมื่อการเปลี่ยนแปลงลำดับของกระบวนการจลนสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการดูดซับ (59)



ภาพประกอบ 39 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว

: ก) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ว้าว 300 °C ข) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ว้าว 400 °C และ ค) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ว้าว 500 °C

ตารางที่ 6 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกว้าว

แบบจำลองจลนพลศาสตร์	ถ่านไบโอชาร์ว้าว 300 °C	ถ่านไบโอชาร์ว้าว 400 °C	ถ่านไบโอชาร์ว้าว 500 °C
Pseudo first order (PFO)			
q_e	47.5200	49.1219	49.9750
k_1	0.0700	0.0803	0.0860
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	0.0992	0.5206	1.5892
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	0.7936	4.1652	12.7141
R^2	0.9996	0.99817	0.9946
R^2_{adj}	0.9995	0.9979	0.9939
Pseudo second order (PSO)			
q_e	51.9395	53.0306	53.7551
k_2	0.0021	0.0025	0.0027
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	3.8851	6.4723	9.0984
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	31.0839	51.7787	72.7868
R^2	0.9855	0.9772	0.9692
R^2_{adj}	0.9837	0.9743	0.9653
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)			
q_e	47.4948	48.8882	50.1667
k_1	0.0676	0.0263	0.1000
α	1.0123	1.3025	0.8633
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	0.1101	0.2674	6.3764
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	0.7703	1.8719	44.6353
R^2	0.9996	0.9991	0.9811
R^2_{adj}	0.9995	0.9989	0.9757

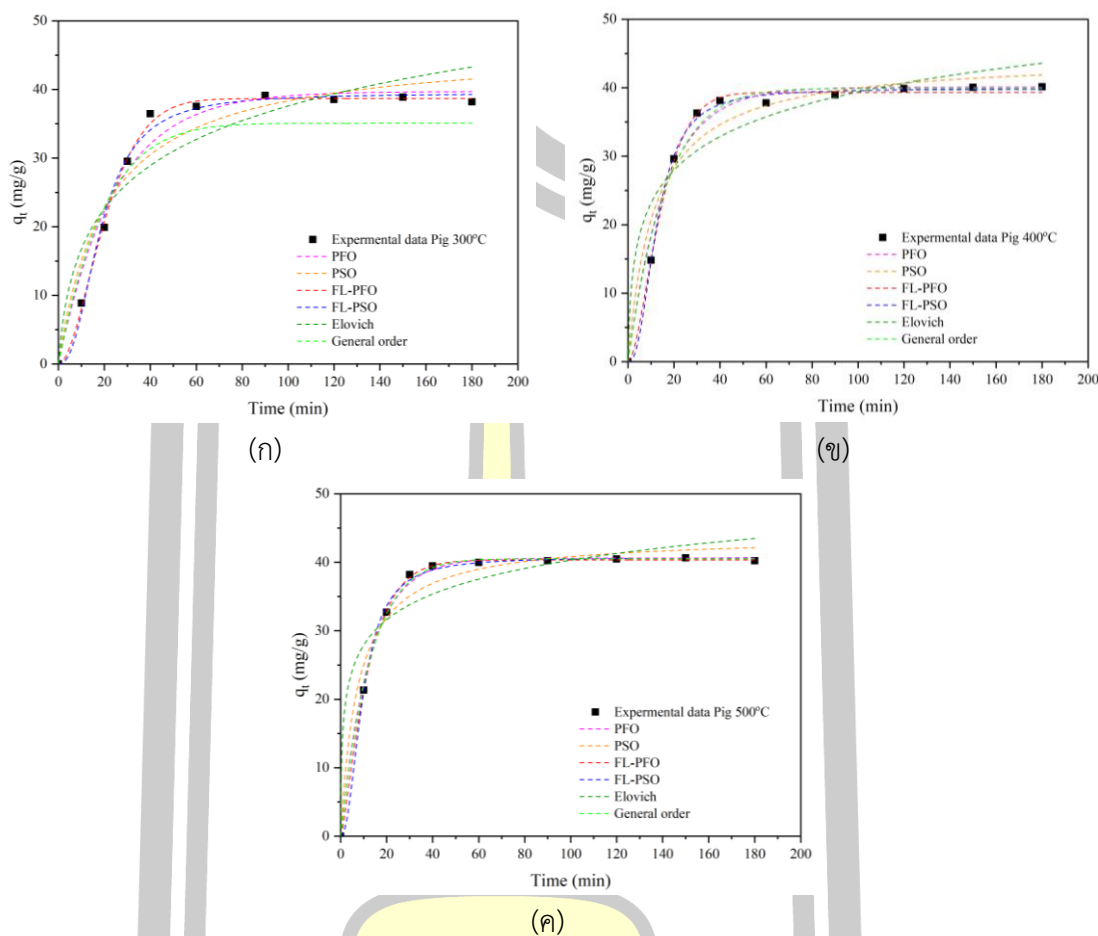
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)			
q_e	48.2643	49.3419	49.7716
k_2	3.4791	1.9357	6.3868
α	1.7502	2.0635	2.5493
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	0.3016	0.7421	0.1933
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	2.1114	5.1949	1.3531
R^2	0.9990	0.9977	0.9994
R^2_{adj}	0.9987	0.9970	0.9926
Elovich			
α_ϵ	45.7441	119.6532	191.5693
β_ϵ	0.1372	0.1543	0.1617
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	13.7738	18.0203	21.6704
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	110.1909	144.1629	173.3637
R^2	0.9486	0.9365	0.9267
R^2_{adj}	0.9422	0.9286	0.9175
General (rational) order			
q_e	47.5023	49.0169	49.8762
k_r	0.0723	0.1013	0.1070
n	0.9900	0.9272	0.9324
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	4.4517	0.3517	1.3419
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	31.1621	2.4620	9.3934
R^2	0.9813	0.9989	0.9960
R^2_{adj}	0.9995	0.9986	0.9949

ภาพประกอบ 40 ก) และ ค) แสดงถึงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C มีลักษณะกราฟสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) ซึ่งมีลักษณะการดูดซับเป็นแบบพื้นผิวแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (84) จากตาราง 7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์หมูใช้พิจารณาจากค่า adjusted R-squared ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C โดยมีค่าเท่ากับ 0.99681 0.99956 ตามลำดับ อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)

¹⁾ (0.6503 และ 0.0754) Res. sum of squ. (4.5524 และ 0.5270) ถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C สอดคล้องกับแบบจำลองแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 38.6739 และ 40.3371 mg/g ตามลำดับ

ภาพประกอบ 40 ข) แสดงถึงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 400 °C จากการศึกษาลักษณะกราฟของถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 400 °C มีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Fractal-like pseudo second order (FL-PSO) แบบจำลองจลนพลศาสตร์นี้มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบพื้นผิวที่แตกต่างกันและไม่เหมือนกัน (85) ซึ่งจะพิจารณา adjusted R-squared จากตาราง 7 ค่า adjusted R-squared ของถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่าเท่ากับ 0.9976 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.4405) Res. sum of squ. (3.0838) แสดงให้เห็นว่าถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 400 °C สอดคล้องกับแบบจำลอง Fractal-like pseudo second order (FL-PSO) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 39.8434 mg/g

จากการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก กระดุกว้าวและหมู่ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบว่า ถ่านไบโอชาร์ว้าวที่อุณหภูมิ 300 °C มีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) มากที่สุด โดยมีลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับระหว่างของเหลวและของแข็ง (83) ถ่านไบโอชาร์ว้าวที่อุณหภูมิ 400 °C มีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Fractal-like pseudo first order model (FL-PFO) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบซับพื้นผิวแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (84) และถ่านไบโอชาร์ว้าวที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลองของ General (rational) order ส่วนถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C มีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Fractal-like pseudo first order (FL-PFO) ซึ่งมีลักษณะการดูดซับเป็นแบบพื้นผิวแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (84) และถ่านไบโอชาร์หมู่ที่อุณหภูมิ 400 °C มีลักษณะสอดคล้องกับแบบจำลองของ Fractal-like pseudo second order (FL-PSO) มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบพื้นผิวที่แตกต่างกันและไม่เหมือนกัน (85) บ่งบอกถึงการดูดซับแบบกายภาพ



ภาพประกอบ 40 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก
กระดุกหมู

: ก) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C ข) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ
ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C และ ค) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C

ตารางที่ 7 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก
กระดุกหมู

แบบจำลองจลนพลศาสตร์	ถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C
Pseudo first order (PFO)			
q_e	39.7063	40.0766	40.6106
k_1	0.0412	0.0621	0.0803

<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	6.5298	3.2024	0.4303
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	52.2389	25.6198	3.4429
R^2	0.9714	0.9845	0.9977
R^2_{agj}	0.9679	0.9825	0.9975
Pseudo second order (PSO)			
q_e	46.2868	44.5485	43.8919
k_2	0.0010	0.0016	0.0030
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	14.1703	8.9433	4.6549
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	113.3624	71.5468	37.2395
R^2	0.9381	0.9567	0.9761
R^2_{agj}	0.9304	0.9513	0.9731
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)			
q_e	38.6739	39.3153	40.3371
k_1	0.0019	0.0056	0.0219
α	1.8768	1.7427	1.3722
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	0.6503	0.5903	0.0754
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	4.5524	4.1323	0.5277
R^2	0.9975	0.9975	0.9996
R^2_{agj}	0.9968	0.9967	0.9995
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)			
q_e	39.4340	39.8434	40.7255
k_2	2.3129	5.6764	1.9038
α	2.4011	2.4124	2.1427
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	1.8325	0.4405	0.3064
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	12.8276	3.0838	2.1452
R^2	0.9930	0.9981	0.9986
R^2_{agj}	0.9910	0.9976	0.9982
Elovich			
$\alpha_{(e)}$	4.4331	17.5324	93.4211
$\beta_{(e)}$	0.1019	0.1397	0.1849

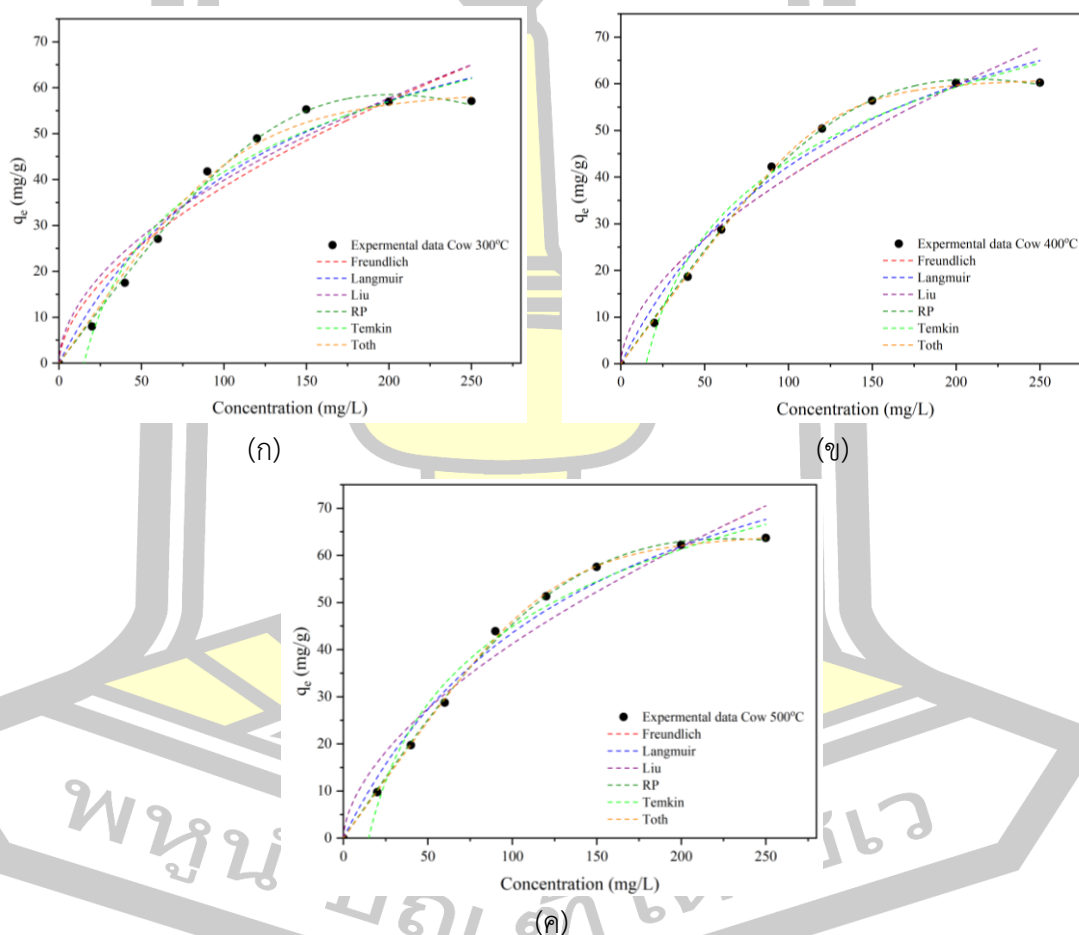
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	24.9222	18.9277	12.6574
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	199.3776	151.4221	101.2672
<i>R²</i>	0.8911	0.9084	0.9350
<i>R²_{adj}</i>	0.8775	0.8970	0.9269
General (rational) order			
<i>q_e</i>	35.0760	39.8974	40.5153
<i>k_r</i>	0.0739	0.0834	0.0999
<i>n</i>	0.8882	0.9057	0.9272
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	18.2407	3.0515	0.2795
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	127.6855	21.3610	1.9568
<i>R²</i>	0.9303	0.9870	0.9987
<i>R²_{adj}</i>	0.9101	0.9834	0.9983

4.3.6. ผลการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์วีวและหมูทั้งสาม อุณหภูมิ คำนวณจากสมการความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับในสภาวะที่สมดุลจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไอโซเทอรัมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ทั้งหมด 6 แบบจำลองแสดงดังนี้ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm), ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm), ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm), ไอโซเทอมแบบเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm), ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm) และไอโซเทอมแบบเทมกิน (Temkin isotherm) เพื่ออธิบายลักษณะกลไกของการดูดซับทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวีวและหมู

จากภาพประกอบ 41 แสดงถึงลักษณะไอโซเทอมในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวีวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C ภาพประกอบ 41 ก) แสดงถึงไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์วีวที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อนำมาศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าถ่านไบโอชาร์วีวที่อุณหภูมิ 300 °C ลักษณะของกราฟมีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson) ค่อนข้างสูงโดยพิจารณาจากค่า adjusted R-squared เท่ากับ 0.9959 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹) (2.0097) Res. sum of squ. (12.0581) ถ่านไบโอชาร์วีวที่อุณหภูมิ 300 °C มีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-

Peterson) ซึ่งมีลักษณะการดูดซับเป็นแบบหลายชั้นและจะเกิดขึ้นในช่วงแรกเท่านั้น (86) ภาพประกอบ 41 ข) และ ค) แสดงถึงไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์วุ้นที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C เมื่อนำมาศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าลักษณะของกราฟมีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) เหมือนกันทั้ง 2 อุณหภูมิ โดยพิจารณาจากค่า adjusted R-squared ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด โดยถ่านไบโอชาร์วุ้นที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C มีค่า adjusted R-squared เท่ากับ 0.9992 และ 0.9990 ตามลำดับ อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (0.9767 และ 0.5482) Res. sum of squ. (2.2604 และ 3.2892) และแสดงความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับ 61.0953 และ 64.8892 mg/g ตามลำดับ และไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบในตัวดูดซับที่มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (87)



ภาพประกอบ 41 ภาพแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุก
วัว

: ก) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 300 °C ข) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 °C

ตารางที่ 8 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว

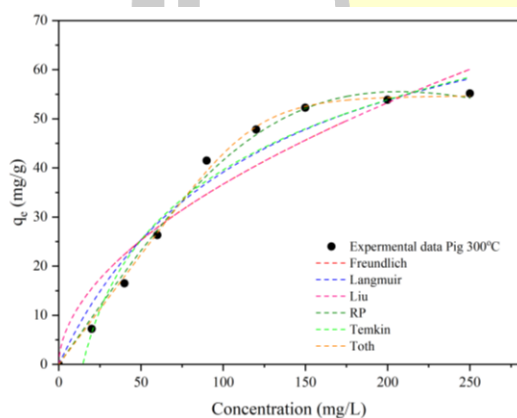
แบบจำลองไอโซเทอม	ถ่านไบโอชาร์วัว 300 °C	ถ่านไบโอชาร์วัว 400 °C	ถ่านไบโอชาร์วัว 500 °C
Freundlich isotherm			
k_f	2.7547	2.7916	2.7831
n_f	1.7472	1.7307	1.7083
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	37.4955	31.9816	27.5454
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	262.4689	223.8716	192.8182
R^2	0.9334	0.9469	0.8571
R^2_{adj}	0.9239	0.9394	0.9510
Langmuir isotherm			
q_m	95.6487	101.1140	106.9265
k_l	0.0074	0.0071	0.0068
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	17.3045	12.9855	10.2034
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	121.1319	90.8988	71.4239
R^2	0.9692	0.9784	0.9818
R^2_{adj}	0.9649	0.9754	0.9815
Liu isotherm			
q_m	2.6531	1.3694	1.3645
k_g	0.0154	1.3280	1.3209
n_g	1.9764	1.7306	1.7083
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	3.15737	37.3119	32.1363
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	18.9442	223.8716	192.8182
R^2	0.9952	0.9469	0.9571

R^2_{adj}	0.9936	0.9293	0.9428
Redlich-Peterson isotherm			
k_{rp}	0.4766	0.4983	0.5199
α_r	7.8029	2.2229	6.7650
b	2.5672	2.3719	2.1659
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	2.0097	0.8193	1.0855
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	12.0587	4.9161	6.5129
R^2	0.9969	0.9988	0.9985
R^2_{adj}	0.9959	0.9984	0.9980
Toth isotherm			
q_m	60.0000	61.0953	64.8897
K_{th}	0.0084	0.0078	0.0076
n_{th}	3.0000	4.7284	3.8873
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	4.5241	0.9767	0.5482
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	27.1447	2.2604	3.2892
R^2	0.9931	0.9994	0.9992
R^2_{adj}	0.9908	0.9992	0.9990
Temkin isotherm			
b_t	22.1073	22.9197	23.6607
k_t	0.0658	0.0664	0.0667
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	13.0693	9.7965	8.9159
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	91.4856	68.5899	62.4113
R^2	0.9768	0.9814	0.9841
R^2_{adj}	0.9735	0.9814	0.9841

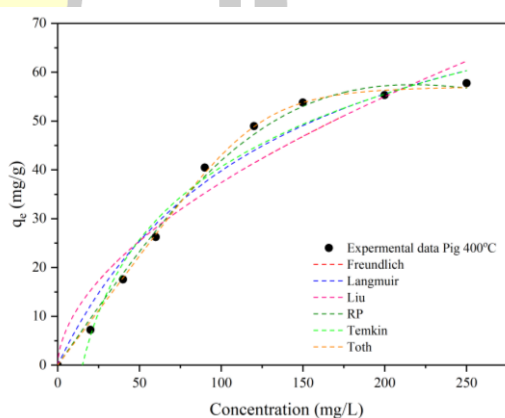
ภาพประกอบ 42 แสดงถึงไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C จากภาพประกอบ 42 ก) ข) และ ค) แสดงถึงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C จากการศึกษพบว่าถ่านไบโอชาร์หมูทั้ง 3 อุณหภูมิ มีลักษณะกราฟไอโซเทอมในการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) เหมือนกันทั้ง 3 อุณหภูมิ โดย

พิจารณาจากค่า adjusted R-squared ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด จากตารางที่ 9 ถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่า adjusted R-squared เท่ากับ 0.9968 0.9978 และ 0.9983 ตามลำดับ อีกทั้งค่า Reduced Chi-Sqr. (g mg^{-1}) (1.3842 1.0349 และ 0.8292) Res. sum of squ. (11.0741 8.2795 และ 6.6339) ซึ่งและไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) แสดงความสามารถในการดูดซับได้เท่ากับ 57.7321 57.0768 และ 59.4012 mg/g และไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) ประกอบไปด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร (88) มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบในตัวดูดซับที่มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (87)

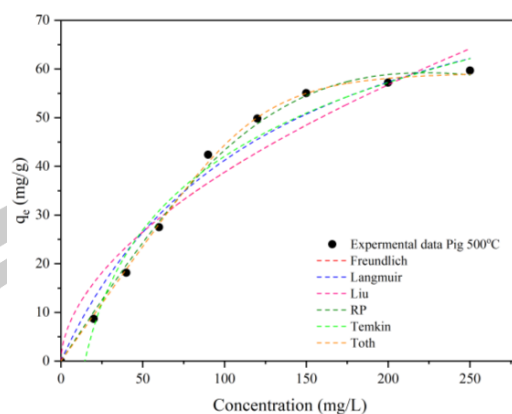
จากการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวสามารถบอกได้ว่า ที่อุณหภูมิ 300 °C มีลักษณะไอโซเทอมที่สอดคล้องกับไอโซเทอมของเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich–Peterson) มากที่สุด มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น และที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C มีลักษณะไอโซเทอมสอดคล้องกับไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) มากที่สุด อีกทั้งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C ยังมีลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) มากที่สุดทั้ง 3 อุณหภูมิ ซึ่งแบบจำลองไอโซเทอมของทอธ (Toth isotherm) มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบตัวดูดซับที่มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการดูดซับทางกายภาพ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 42 ภาพแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก

กระดุกหมู

: ก) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C ข) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C

ตารางที่ 9 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกหมู

แบบจำลองไอโซเทอม	ถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C
Freundlich isotherm			
k_f	3.0825	2.8856	3.1027
n_f	1.8591	1.7974	1.8227
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	33.1115	29.5189	27.9063
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	298.0041	265.6706	251.1572
R^2	0.9320	0.9434	0.9488
R^2_{adj}	0.9245	0.9371	0.9431
Langmuir isotherm			
q_m	86.0433	91.8778	93.8280
k_l	0.0083	0.0076	0.0078

<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	15.3636	12.9824	11.4727
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	138.2724	116.8423	103.2550
<i>R²</i>	0.9684	0.9751	0.9789
<i>R²_{adj}</i>	0.9649	0.9723	0.9766
Liu isotherm			
<i>q_m</i>	1.5105	1.4154	1.5248
<i>k_g</i>	1.4626	1.3757	1.4553
<i>n_g</i>	1.8586	1.7972	1.8226
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	37.2505	33.2088	31.3946
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	298.0042	265.6707	251.1572
<i>R²</i>	0.9320	0.9436	0.9488
<i>R²_{adj}</i>	0.9151	0.9293	0.9360
Redlich-Peterson isotherm			
<i>k_{rp}</i>	0.4769	0.4792	0.5047
<i>α_r</i>	3.9331	4.9799	9.6168
<i>b</i>	2.2868	2.2304	2.1170
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	3.5346	3.0223	2.4096
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	28.2773	24.1785	19.2769
<i>R²</i>	0.9935	0.9948	0.9960
<i>R²_{adj}</i>	0.9919	0.9935	0.9950
Toth isotherm			
<i>q_m</i>	54.7321	57.0768	59.4012
<i>K_{th}</i>	0.0081	0.0078	0.0079
<i>n_{th}</i>	6.1147	5.6402	4.7128
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	1.3842	1.0349	0.8292
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	11.0741	8.2795	6.6339
<i>R²</i>	0.9974	0.9982	0.9986
<i>R²_{adj}</i>	0.9968	0.9978	0.9983
Temkin isotherm			
<i>b_t</i>	20.6092	21.5299	21.8666

k_t	0.0682	0.0659	0.0684
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	11.4586	9.0536	8.8350
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	103.1276	81.4802	79.5153
R^2	0.9764	0.9826	0.9838
R^2_{adj}	0.9738	0.9807	0.9820

4.3.7. ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับ (Thermodynamic adsorption)

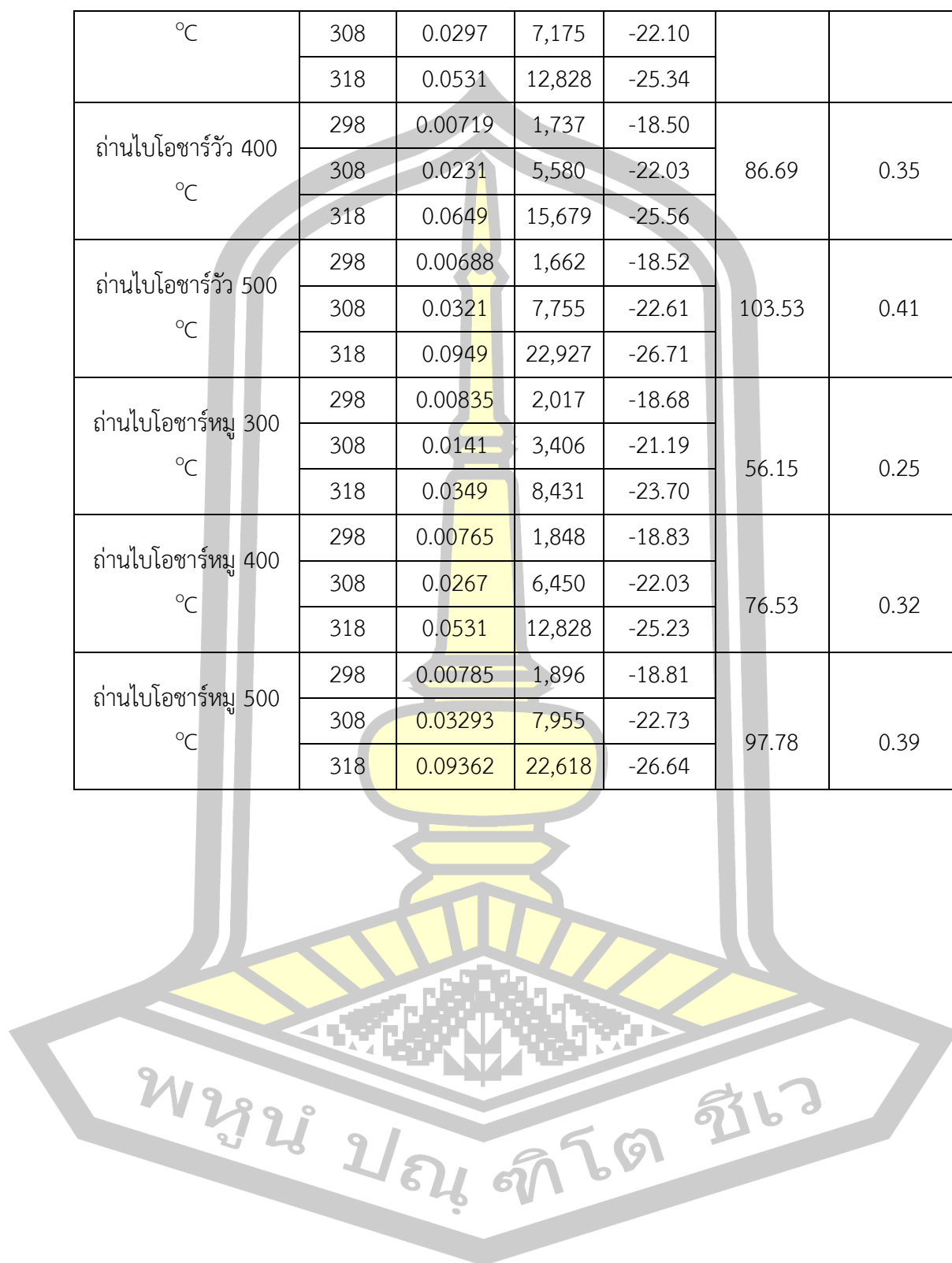
จากการศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับโลหะหนักทองแดงจากถ่านไบโอชาร์วู้ด และหมูที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C ทำการศึกษาทั้งหมด 3 อุณหภูมิ คือ 25 35 และ 45 °C โดยการนำค่า K_L หรือค่า K_e ของแต่ละอุณหภูมิมาคำนวณ

ผลบวกของ ΔH° แสดงถึงลักษณะการดูดซับด้วยความร้อนของการดูดซับโลหะหนักทองแดงจากถ่านไบโอชาร์วู้ดที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู จากตารางที่ 10 พบว่าค่า ΔH° ของถ่านไบโอชาร์วู้ดที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่าเท่ากับ 77.78 86.69 และ 103.53 $kJ\ mol^{-1}$ ตามลำดับ เช่นเดียวกันค่า ΔH° ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่าเท่ากับ 56.15 76.53 และ 97.78 $kJ\ mol^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะบอกถึงลักษณะการดูดซับที่เป็นการดูดซับแบบกายภาพ อีกทั้งยังแสดงค่า ΔS° ซึ่งจะบอกถึงค่าการเปลี่ยนแปลง entropy และแสดงถึงค่า ΔG° จะบอกถึงค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ซึ่งค่า ΔG° ของถ่านไบโอชาร์วู้ดและหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่าประมาณ -18 ถึง -26 $kJ\ mol^{-1}$ ซึ่งค่า ΔG° บ่งบอกถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นเองและเกิดอุณหพลศาสตร์ค่อนข้างดี นอกจากนี้ยังค่า ΔG° เป็นลบมากเท่าไรแรงผลักดันของ ΔG° ก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น (59) ค่าที่กล่าวมาสามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับซึ่งการดูดซับโลหะหนักทองแดง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกการดูดซับของถ่านไบโอชาร์วู้ดที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู

วัสดุดูดซับ	อุณหภูมิ (K)	K_L ($L\ mg^{-1}$) ¹⁾	K_e	ΔG° ($kJ\ mol^{-1}$) ¹⁾	ΔH° ($kJ\ mol^{-1}$) ¹⁾	ΔS° ($kJ\ K^{-1}\ mol^{-1}$) ¹⁾
ถ่านไบโอชาร์วู้ด 300	298	0.00743	1,795	-18.85	77.78	0.32

°C	308	0.0297	7,175	-22.10		
	318	0.0531	12,828	-25.34		
ถ่านไบโอชาร์วัว 400 °C	298	0.00719	1,737	-18.50	86.69	0.35
	308	0.0231	5,580	-22.03		
	318	0.0649	15,679	-25.56		
ถ่านไบโอชาร์วัว 500 °C	298	0.00688	1,662	-18.52	103.53	0.41
	308	0.0321	7,755	-22.61		
	318	0.0949	22,927	-26.71		
ถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C	298	0.00835	2,017	-18.68	56.15	0.25
	308	0.0141	3,406	-21.19		
	318	0.0349	8,431	-23.70		
ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C	298	0.00765	1,848	-18.83	76.53	0.32
	308	0.0267	6,450	-22.03		
	318	0.0531	12,828	-25.23		
ถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C	298	0.00785	1,896	-18.81	97.78	0.39
	308	0.03293	7,955	-22.73		
	318	0.09362	22,618	-26.64		



บทที่ 5

สรุปอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งเป็นการนำกระดูกเหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระดูกวัวและหมูก่อนและหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์วัวและหมูด้วยเครื่องมือ SEM EDX XRD FTIR BET และ CHNS และศึกษาลักษณะการดูดซับโลหะหนักทองแดง โดยใช้ปัจจัยดังนี้ ศึกษาค่า pH_{pzc} ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของโลหะหนักทองแดง ไอโซเทอมของการดูดซับ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับและเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ ผลการศึกษาแสดงผลดังนี้

5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระดูกวัวและหมูก่อนและหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

ลักษณะทางกายภาพของกระดูกวัวและหมูก่อนเผามีลักษณะแตกต่างกันที่ขนาดของกระดูกทั้งสองชนิด ลักษณะสีของกระดูกวัวมีสีขาวส่วนกระดูกหมูมีสีขาว-เหลือง และลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์วัวและหมูมีลักษณะแตกต่างกันที่ความเป็นมันวาวของถ่านไบโอชาร์วัวส่วนถ่านไบโอชาร์หมูจะไม่มีความเป็นมันวาว เนื่องจากถ่านไบโอชาร์หมูมีน้ำมันในตัวกระดูกน้อยกว่าถ่านไบโอชาร์วัว แต่ทั้งนี้ถ่านไบโอชาร์วัวและหมูมีลักษณะของรูปร่างหลังจากการเผาที่เหมือนกันคือยังคงสภาพความเป็นกระดูกก่อนเผาได้อย่างเหมือนเดิม และเมื่อทำการทุบหรือบดถ่านไบโอชาร์ทั้งสองชนิด สามารถบดถ่านไบโอชาร์หมูได้ละเอียดกว่าถ่านไบโอชาร์วัวเนื่องจากถ่านไบโอชาร์วัวเป็นชิ้นใหญ่และมีความแข็งมากกว่าถ่านไบโอชาร์หมู

5.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C ใช้เครื่องมือในการศึกษาดังนี้ เครื่องมือ SEM-EDX XRD FTIR BET และ CHNS จากการศึกษาพบว่าถ่านไบโอชาร์วัวมีลักษณะเป็นมันวาว ไม่มีรูพรุน ถ่านไบโอชาร์หมูมีลักษณะพื้นผิวไม่เป็นมันวาว ไม่เรียบมีความขรุขระและมีลักษณะเห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความพรุนเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น มีองค์ประกอบ

ของธาตุคาร์บอนเป็นหลักในทุกอนุหภูมิ โดยมีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ 20-55 % และมีองค์ประกอบของธาตุอื่น ๆ รองลงมาเสมอ อีกทั้งยังพบลักษณะโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ (ระนาบ 200) CaO (ระนาบ 002 200 220) และ Ca(OH)₂ (ระนาบ 102 110) แสดงถึงผลึกที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน โดยถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุมีกลุ่มพันธะที่เกิดขึ้นมีพันธะของกรดคาร์บอกซิลิก หมูอัลเคน และกลุ่มฟังก์ชันเอมีน มีลักษณะของไอโซเทอมก่อนการดูดซับพบว่าถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุมีลักษณะไอโซเทอมเป็นแบบ type III เกิดขึ้นได้ง่ายเกิดขึ้นแบบ multilayer ส่วนปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นมากที่สุดจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ 500 °C มีปริมาณรูพรุนของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุมากที่สุดเท่ากับ 77.306 m²/g และ 77.029 m²/g ตามลำดับ อีกทั้งถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุก็มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 – 15 นาโนเมตร เป็นรูพรุนชนิด mesoporous ซึ่งบ่งชี้ว่ามีรูพรุนโดยเฉลี่ยในธรรมชาติ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้นสูงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังมีองค์ประกอบของค่า CHNS เพื่อยืนยันความเป็นคาร์บอนอสัณฐาน เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่วัดค่าได้มีค่าสูงที่สุด จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุเตรียมได้จากกระดูกว้าวและหมุปริมาณของคาร์บอนที่พบเจอแสดงให้เห็นว่าถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุเป็นลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน ซึ่งไม่เพียงแต่ปริมาณของคาร์บอนที่บ่งบอกแต่ยังมีค่าของกลุ่มฟังก์ชัน ผลึกของโครงสร้าง อีกทั้งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแสดงให้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนของโครงสร้างและรูพรุนทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ และยังมีลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากองค์ประกอบข้างต้นสามารถทำให้แน่ใจได้ว่าถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคาร์บอนอสัณฐาน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้ไม่ว่าจะเป็น การปรับปรุงดิน การบำบัดกลิ่น และการบำบัดน้ำเสียได้เป็นต้น

5.3 ผลการศึกษาลักษณะการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุที่เตรียมได้จากกระดูกว้าวและกระดูกหมู

ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุที่เตรียมได้จากกระดูกว้าวและกระดูกหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุในแต่ละอุณหภูมิ มีค่า pH_{pzc} อยู่ระหว่าง 6-7 มีระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงเวลาที่ 60 นาที และ 40 นาที ตามลำดับ แต่ถ่านไบโอชาร์ว้าวจะสามารถกำจัดโลหะหนักทองแดงได้มากกว่าถ่านไบโอชาร์หมูประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร หรือคิดเป็น 33.33 เปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ว้าวและหมุเหมาะสมกับตัวดูดซับในปริมาณที่ 2 กรัม และพบว่าความเข้มข้นที่เข้าสู่สภาวะสมดุลสำหรับการดูดซับมีค่าเข้มข้นเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสามารถในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ว้าวทั้ง 2 ชนิด สรุปได้ว่าถ่านไบโอชาร์ว้าวมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าถ่านไบโอชาร์หมูคิดเป็น 6.29 % นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์แบบจำลองของจลนพลศาสตร์การดูดซับ ซึ่งแบบจำลองการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับถ่านไบโอชาร์ว้าว

และหมู่ เหมาะสมกับแบบจำลองของสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) Fractal-like pseudo first order model (FL-PFO) Fractal-like pseudo second order (FL-PSO) และ General (rational) order ซึ่งแต่ละแบบจำลองจะมีลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพ อีกทั้งยังวิเคราะห์แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมที่เหมาะสมได้แก่ Redlich-Peterson isotherm Toth isotherm บ่งบอกถึงลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพ และ ยังวิเคราะห์ค่าเทอร์โมไดนามิกซึ่งค่าต่าง ๆ ของการวิเคราะห์บ่งบอกไปถึงลักษณะการดูดซับว่าเป็น การดูดซับทางกายภาพและจากผลการศึกษาค่าต่าง ๆ ของเทอร์โมไดนามิกสามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิ มีผลต่อการดูดซับซึ่งการดูดซับโลหะหนักทองแดง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับความสามารถในการ ดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากผลการวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก ทองแดง (Cu^{2+}) ด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่ อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือก สำหรับการบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังปล่อยสู่แหล่งน้ำ อีกทั้งยังสามารถลดทองแดงในน้ำเสียได้อย่าง แท้จริง แต่ไม่เหมาะสมกับการบำบัดทองแดงในน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากต้องใช้ ปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูจำนวนมากในการบำบัด

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. หากมีการนำถ่านไบโอชาร์กระดูกวัวและหมูไปใช้จริงควรมีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ทางเศรษฐศาสตร์และสังคมด้วย เนื่องจากการผลิตค่อนข้างใช้เชื้อเพลิงในการผลิตเยอะ
2. ควรศึกษากระบวนการผลิตถ่านไบโอชาร์โดยใช้วัสดุชนิดอื่น เช่น กระดุกปลา เป็นต้น
3. ควรมีการศึกษาระบวนการกระตุ้นโดยใช้วิธีทางเคมี เช่นการกระตุ้นด้วยสารเคมี เพื่อ เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดีขึ้น
4. ควรนำไปศึกษากระบวนการการดูดซับทางอากาศลองดู เพื่อเพิ่มความหลากหลายใน การนำไปใช้งาน

พูน ปณ จิต ชีเว

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. สำนักพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าปศุสัตว์. โรงฆ่าสัตว์ที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการฆ่าสัตว์ 2022 [Available from: <https://certify.dld.go.th/certify/index.php/th/>].
2. Utilization of cow bone Thailand [Available from: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2520_83_22_26.pdf].
3. ดวงใจ วัยเจริญ, เกษร จำปา. ถ่านชีวภาพตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพ 2019 [Available from: https://www.opsmoac.go.th/chachoengsao-article_prov-files-431391791813].
4. Alkurdi SS, Al-Juboori RA, Bundschuh J, Hamawand I. Bone char as a green sorbent for removing health threatening fluoride from drinking water. Environment international. 2019;127:704-19.
5. SUPPAPRUEK M, THREEPOP NATKUL P. PREPARATION OF CELLULOSE BASED ION EXCHANGE RESINS FROM WATER HYACINTH FOR THE REMOVAL OF HEAVY METAL CATIONS FROM WASTE WATER: Silpakorn University; 2022.
6. Verbych S, Hilal N, Sorokin G, Leaper M. Ion exchange extraction of heavy metal ions from wastewater. Separation science and technology. 2005;39(9):2031-40.
7. Lakherwal D. Adsorption of heavy metals: a review. International journal of environmental research and development. 2014;4(1):41-8.
8. Barakat M. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. Arabian journal of chemistry. 2011;4(4):361-77.
9. Hua M, Zhang S, Pan B, Zhang W, Lv L, Zhang Q. Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: a review. Journal of hazardous materials. 2012;211:317-31.
10. Wei X, Kong X, Wang S, Xiang H, Wang J, Chen J. Removal of heavy metals from electroplating wastewater by thin-film composite nanofiltration hollow-fiber membranes. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013;52(49):17583-90.

11. DNA reveals that cows were almost impossible to domesticate [Available from: <https://gizmodo.com/>].
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Available from: <https://www.un.org/en/ccoi/fao-food-and-agriculture-organization-united-nations>].
13. Treating beef like coal would make a big dent in greenhouse-gas emissions [Available from: <https://www.economist.com/graphic-detail/2021/10/02/treating-beef-like-coal-would-make-a-big-dent-in-greenhouse-gas-emissions>].
14. FAO – News Article: Key facts and findings [Available from: <https://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode/>].
15. Scientists Unravel Genome of the Cow [Available from: <https://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2009/04/23/AR2009042303453.html>].
16. History of Beef in Thailand [Thaialad2017](http://www.farmsteadinc.com/) [Available from: <https://www.farmsteadinc.com/>].
17. pig farming 2017 [Available from: <https://www.trueplookpanya.com>].
18. Sirising S, Suksawang O. Biochar application to soil improvement for agriculture. *Journal of Social Sciences and Humanities (Thailand)*. 2013.
19. Wongsiriamnuai T. Biochar production and utilization 2019 [Available from: <https://erp.mju.ac.th/acticleDetail.aspx?qid=1072>].
20. Kumar S, Loganathan VA, Gupta RB, Barnett MO. An assessment of U (VI) removal from groundwater using biochar produced from hydrothermal carbonization. *Journal of environmental management*. 2011;92(10):2504-12.
21. สะอาด ก. มา รู้จัก ถ่าน ชีวภาพ กันเถอะ. [https://library ipst ac th/handle/ipst/5531](https://library.ipst.ac.th/handle/ipst/5531).
22. Vogelmeier CF, Criner GJ, Martinez FJ, Anzueto A, Barnes PJ, Bourbeau J, et al. Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive lung disease 2017 report. GOLD executive summary. *American journal of respiratory and critical care medicine*. 2017;195(5):557-82.

23. Pituya P. Documentation on Biochar 2014 [Available from: http://www.baanwin.com/_files/download/biochar.pdf.
24. De Dardel F, Arden TV. Ion exchangers. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 2000.
25. Wikipedia. Ion-exchange resin 2023 [Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Ion-exchange_resin.
26. Mulder M, Mulder J. Basic principles of membrane technology: Springer science & business media; 1996.
27. Cheryan M, Rajagopalan N. Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. Journal of membrane science. 1998;151(1):13-28.
28. Jenkins S. Membranes on Polyolefins Plants Vent Recovery. Chemical Engineering. 2013;120(3):9-10.
29. Wikipedia. Membrane 2023 [Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane>.
30. Wikipedia. Electrostatics 2023 [Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatics>.
31. Roy Y, Warsinger DM. Effect of temperature on ion transport in nanofiltration membranes: Diffusion, convection and electromigration. Desalination. 2017;420:241-57.
32. Baker L, Martin C. Nanotechnology in Biology and Medicine Methods, Devices, and Applications. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. 2007;9:1-24.
33. Apel PY, Blonskaya I, Dmitriev S, Orelovitch O, Sartowska B. Structure of polycarbonate track-etch membranes: Origin of the “paradoxical” pore shape. Journal of Membrane Science. 2006;282(1-2):393-400.
34. Baker LA, Choi Y, Martin CR. Nanopore membranes for biomaterials synthesis, biosensing and bioseparations. Current Nanoscience. 2006;2(3):243-55.
35. Mohammad A, Hilal N, Al-Zoubib H, Darwish N, Ali N. Modelling the effects of nanofiltration membrane properties on system cost assessment for desalination applications. Desalination. 2007;206(1-3):215-25.

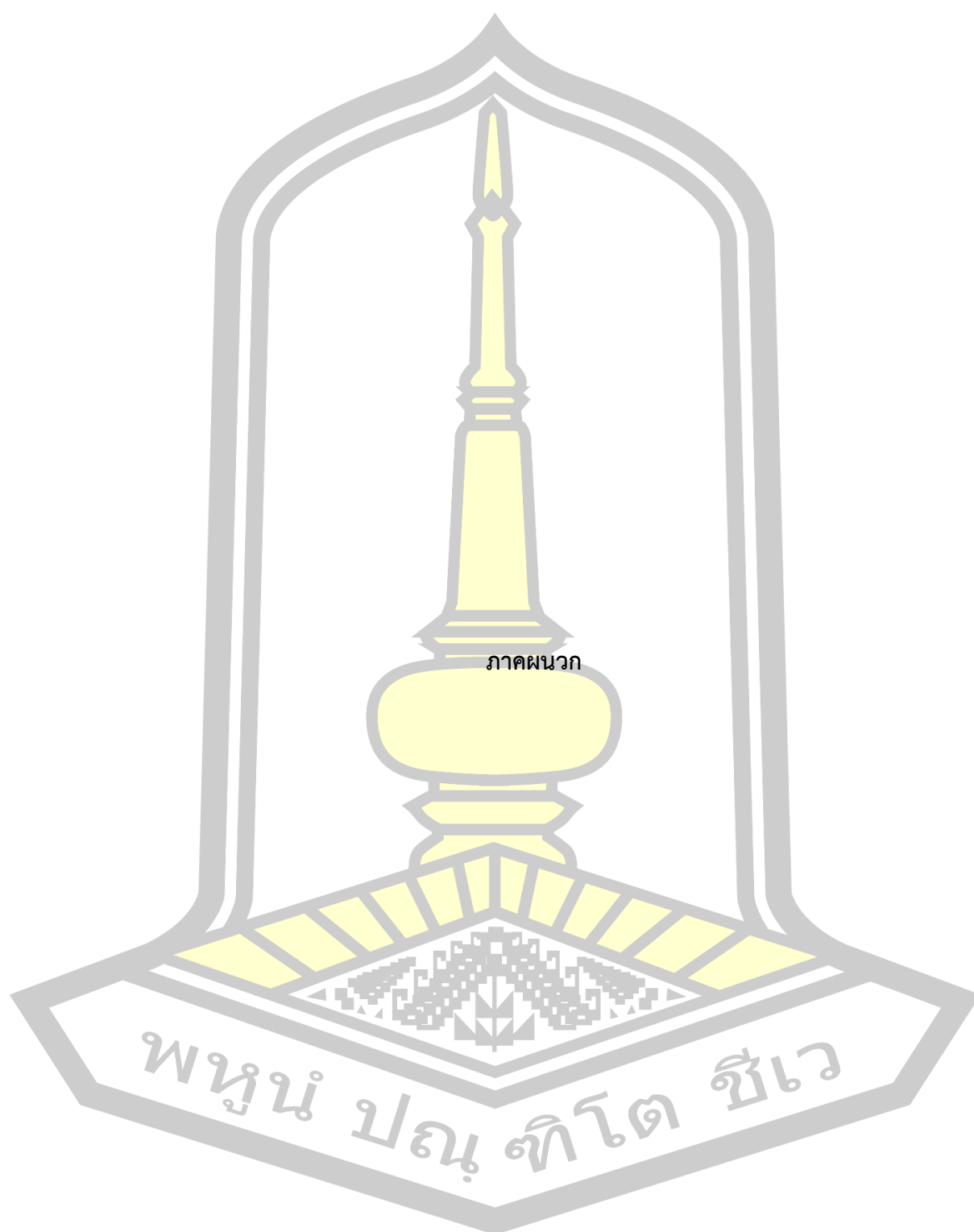
36. Wikipedia. Nanofiltration 2022 [Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanofiltration>.
37. Kumar M, Seth A, Singh AK, Rajput MS, Sikandar M. Remediation strategies for heavy metals contaminated ecosystem: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2021;12:100155.
38. Bolgar P, Lloyd H, Keeler J, North A, Smith S, Oleinikovas V. Student solutions manual to accompany Atkins' physical chemistry: Oxford university press; 2018.
39. Wikipedia. Pure and Applied Chemistry 2020 [Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Pure_and_Applied_Chemistry.
40. Ferrari L, Kaufmann J, Winnefeld F, Plank J. Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements. *Journal of colloid and interface science*. 2010;347(1):15-24.
41. Khosrowshahi MS, Abdol MA, Mashhadimoslem H, Khakpour E, Emrooz HBM, Sadeghzadeh S, et al. The role of surface chemistry on CO₂ adsorption in biomass-derived porous carbons by experimental results and molecular dynamics simulations. *Scientific Reports*. 2022;12(1):8917.
42. Czelej K, Cwieka K, Kurzydłowski KJ. CO₂ stability on the Ni low-index surfaces: van der Waals corrected DFT analysis. *Catalysis Communications*. 2016;80:33-8.
43. Wikipedia. Adsorption 2023 [Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption>.
44. SUDANGAM S, PANYAKAPO M. HEALTH RISK ASSESSMENT OF HEAVY METALS IN GROUND WATER IN NON-HAZARDOUS WASTE LANDFILL AREA, RATCHABURI PROVINCE: Silpakorn University; 2019.
45. Jakkrit SD. Gas and vapor emission control equipment [Available from: <https://www.stou.ac.th/Schools/Shs/upload/2019-05-24%2022-01%20Copy%20of%2054114-6.pdf>.
46. Sing KS. Adsorption methods for the characterization of porous materials. *Advances in colloid and interface science*. 1998;76:3-11.

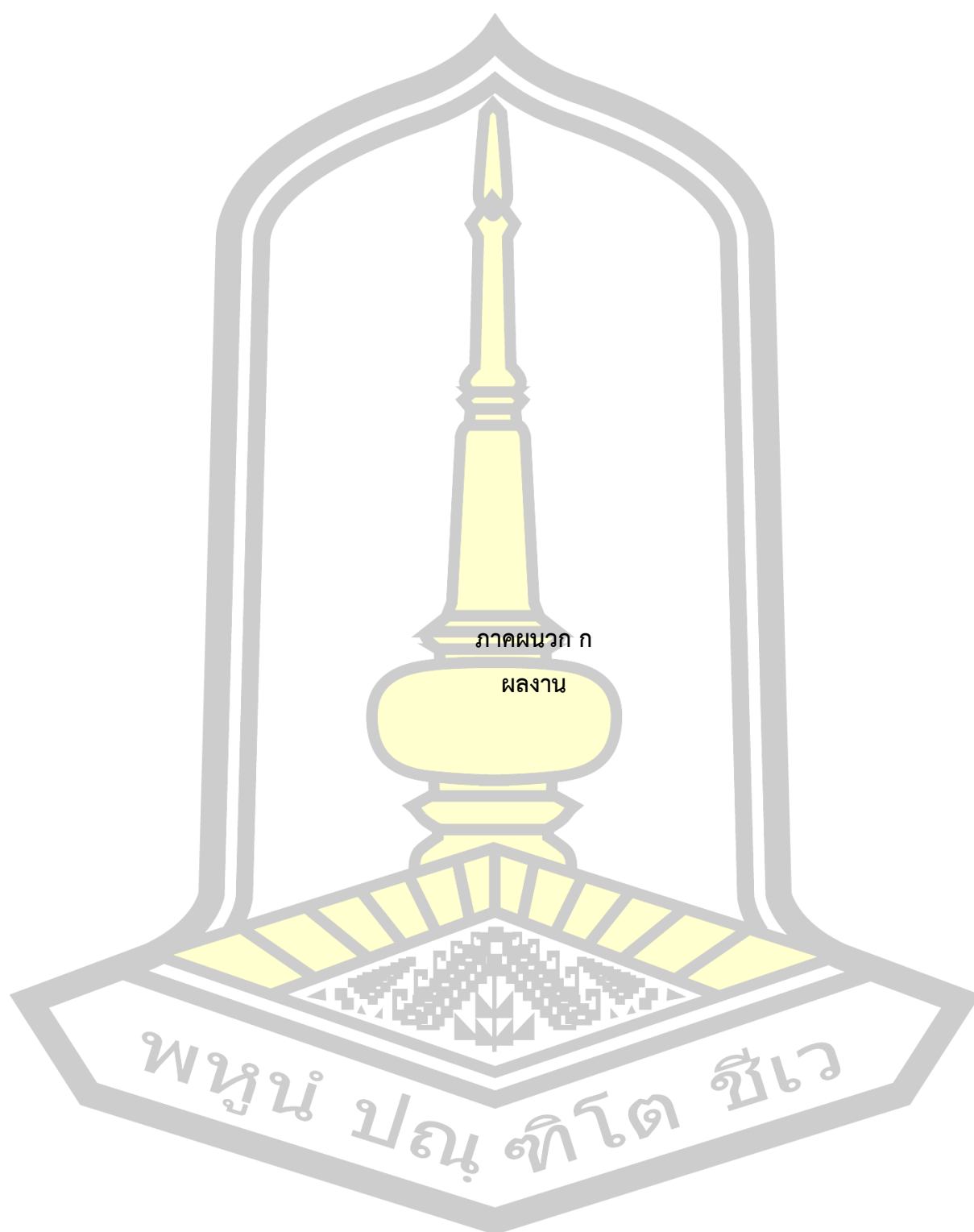
47. Arunlertaree C, Kaewsomboon W, Kumsopa A, Pokethitiyook P, Panyawathanakit P. Removal of lead from battery manufacturing wastewater by egg shell. 2007.
48. Cheremisinoff PN, Ellerbusch F. Carbon adsorption handbook: Ann Arbor Science Publishers; 1978.
49. Suwannahong K, Wongcharee S, Kreetachart T, Sirilamduan C, Rioyo J, Wongphat A. Evaluation of the Microsoft Excel Solver Spreadsheet-Based Program for nonlinear expressions of adsorption Isotherm models onto magnetic nanosorbent. *Applied Sciences*. 2021;11(16):7432.
50. Hu Z, Lei L, Li Y, Ni Y. Chromium adsorption on high-performance activated carbons from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*. 2003;31(1):13-8.
51. สุวรรณ ววจ. ประสิทธิภาพ การ ดูด ซับ ไอออน ตะกั่ว จาก สารละลาย โดยใช้ อิฐ มวล เบา เป็น ตัว ดูด ซับ. 2016.
52. Elwakeel KZ. Magnesium sorption onto titan yellow supported on classic thiourea-formaldehyde resin. *Aswan University Journal of Environmental Studies*. 2020;1(2):125-36.
53. Rudzinski W, Panczyk T. 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):9149-62.
54. Aharoni C, Ungarish M. Kinetics of activated chemisorption. Part 1.—The non-Elvovichian part of the isotherm. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*. 1976;72:400-8.
55. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of colloid and Interface Science*. 2004;276(1):47-52.
56. Marczewski AW. 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):15229-38.
57. Haerifar M, Azizian S. An exponential kinetic model for adsorption at solid/solution interface. *Chemical engineering journal*. 2013;215:65-71.

58. Haerifar M, Azizian S. Fractal-like adsorption kinetics at the solid/solution interface. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012;116(24):13111-9.
59. Bergmann CP, Machado FM. Carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications: Springer; 2015.
60. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals): ทองแดง. 2014.
61. ทองแดง (Copper) ประโยชน์ และพิษทองแดง [Available from: <https://www.siamchemi.com/>].
62. ประโยชน์และโทษของทองแดง (COPPER) 2021 [Available from: <http://www.jctsci.com/article/>].
63. Wang M, Liu Y, Yao Y, Han L, Liu X. Comparative evaluation of bone chars derived from bovine parts: Physicochemical properties and copper sorption behavior. *Science of the Total Environment*. 2020;700:134470.
64. Pan X, Wang J, Zhang D. Sorption of cobalt to bone char: Kinetics, competitive sorption and mechanism. *Desalination*. 2009;249(2):609-14.
65. Alkurdi SS, Herath I, Bundschuh J, Al-Juboori RA, Vithanage M, Mohan D. Biochar versus bone char for a sustainable inorganic arsenic mitigation in water: what needs to be done in future research? *Environment international*. 2019;127:52-69.
66. Yang Y, Sun C, Lin B, Huang Q. Surface modified and activated waste bone char for rapid and efficient VOCs adsorption. *Chemosphere*. 2020;256:127054.
67. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. X-Ray Diffractometer (XRD) [Available from: <https://www.slri.or.th/bdd/th/>].
68. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สอ. FTIR Micro-Spectrometer [Available from: <https://www.slri.or.th/bdd/th/>].
69. BET SURFACE AREA ANALYZER [Available from: <https://www.tmaxlaboratory.com/bet-surface-area-analyzer>].
70. SAECHIAM S, Sripongpun G. ADSORPTION OF MALACHITE GREEN AND REACTIVE RED 31 FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY USING BANANA PEEL ADSORBENTS: Silpakorn University; 2019.

71. Rashed MN, Gad AA-E, Fathy NM. Adsorption of Cd (II) and Pb (II) using physically pretreated camel bone biochar. *Advanced Journal of Chemistry-Section A*. 2019;2(4):347-64.
72. Betts AR, Chen N, Hamilton JG, Peak D. Rates and mechanisms of Zn²⁺ adsorption on a meat and bonemeal biochar. *Environmental science & technology*. 2013;47(24):14350-7.
73. Zhou J, Liu Y, Han Y, Jing F, Chen J. Bone-derived biochar and magnetic biochar for effective removal of fluoride in groundwater: Effects of synthesis method and coexisting chromium. *Water environment research*. 2019;91(7):588-97.
74. Sengsingkhom T. Utilization of biochar coupled with coal combustion products for degraded soil amendment. 2018.
75. Buddhachat K, Klinhom S, Siengdee P, Brown JL, Nomsiri R, Kaewmong P, et al. Elemental analysis of bone, teeth, horn and antler in different animal species using non-invasive handheld X-ray fluorescence. *PLoS One*. 2016;11(5):e0155458.
76. Costa PA, Barreiros MA, Mouquinho AI, Silva OE, Paradela F, Oliveira FAC. Slow pyrolysis of cork granules under nitrogen atmosphere: by-products characterization and their potential valorization. *Biofuel Research Journal*. 2022;9(1):1562-72.
77. Ma Z, Yang Y, Ma Q, Zhou H, Luo X, Liu X, et al. Evolution of the chemical composition, functional group, pore structure and crystallographic structure of bio-char from palm kernel shell pyrolysis under different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017;127:350-9.
78. Luo H, Wang Y, Wen X, Cheng S, Li J, Lin Q. Key roles of the crystal structures of MgO-biochar nanocomposites for enhancing phosphate adsorption. *Science of The Total Environment*. 2021;766:142618.
79. Elnour AY, Alghyamah AA, Shaikh HM, Poulouse AM, Al-Zahrani SM, Anis A, et al. Effect of pyrolysis temperature on biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites. *Applied sciences*. 2019;9(6):1149.

80. Qu J, Zhang B, Tong H, Liu Y, Wang S, Wei S, et al. High-efficiency decontamination of Pb (II) and tetracycline in contaminated water using ball-milled magnetic bone derived biochar. *Journal of Cleaner Production*. 2023;385:135683.
81. Xiao J, Hu R, Chen G. Micro-nano-engineered nitrogenous bone biochar developed with a ball-milling technique for high-efficiency removal of aquatic Cd (II), Cu (II) and Pb (II). *Journal of hazardous materials*. 2020;387:121980.
82. ศรี ไยส. การ กำจัด ฟอสเฟต ใน น้ำ เสีย โดย การ ดูด ซับ ด้วย แคลเซียม คาร์บอเนต และ แคลเซียม ออกไซด์ จาก เปลือก ไข่ไก่. วารสาร วิชาการ พระจอมเกล้า พระนครเหนือ. 2016;26(3).
83. เกลี้ยง นก, ชัย ชยตสภ, ดู, ดี ด. การ ดูด ซับ ของ ของ ผสม ที่ เป็น ไอ ระหว่าง เบน ซีน โท ลู อี น ไช ลี น และ น้ำ ใน ถ่าน กั ม มั น ต์ ที่ ทำ มา จาก ต้น ไม้: การ ทดลอง เปรียบเทียบ กับ การ จำลอง แบบ ของ มอน ตี คาร์ โล: รายงาน วิจัย ฉบับ สมบูรณ์. สำนักงาน คณะ กรรมการ ส่งเสริม วิทยาศาสตร์ วิจัย และ นวัตกรรม; 2017.
84. Wongcharee S, Aravinthan V, Erdei L, Sanongraj W. Mesoporous activated carbon prepared from macadamia nut shell waste by carbon dioxide activation: Comparative characterisation and study of methylene blue removal from aqueous solution. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2018;13(2):e2179.
85. Sobhanardakani S, Zandipak R. Synthesis and application of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparticles as novel adsorbent for removal of Cd (II), Hg (II) and Ni (II) ions from water samples. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017;19:1913-25.
86. Saadi R, Saadi Z, Fazaeli R, Fard NE. Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2015;32:787-99.
87. Foo KY, Hameed BH. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical engineering journal*. 2010;156(1):2-10.
88. วงศ์ อว, รัตน์ ชนโน, รัตน์ อครภฤท. รายงาน การ วิจัย การ ศึกษา และ ใช้ ประโยชน์ ผลิตภัณฑ์ จาก การ ทำ เหมือง (Leonardite) ใน การ ดูด ซับ ยาปราบ ศัตรู พืช ที่ ตกค้าง.







EVE07

Characterization of Derived Biochar via Slow Pyrolysis Process using Cow and Pig Bones as a Raw Precursor

**Pornmongkol Tansomros¹, Poramed Aungthitipan¹, Athicha Janthakot¹,
Aitsara Chanthakhot¹, Pattaranun Maskhunthod¹, Surachai Wongcharee^{2*},
Sukanya Hongthong³, Worachate Sangsida⁴, Chanakran Papayrata⁵
Kowit Suwannahong⁶ and Nida Chaimoon²**

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

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

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

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

⁵Laboratory Equipment Center of Mahasarakham University

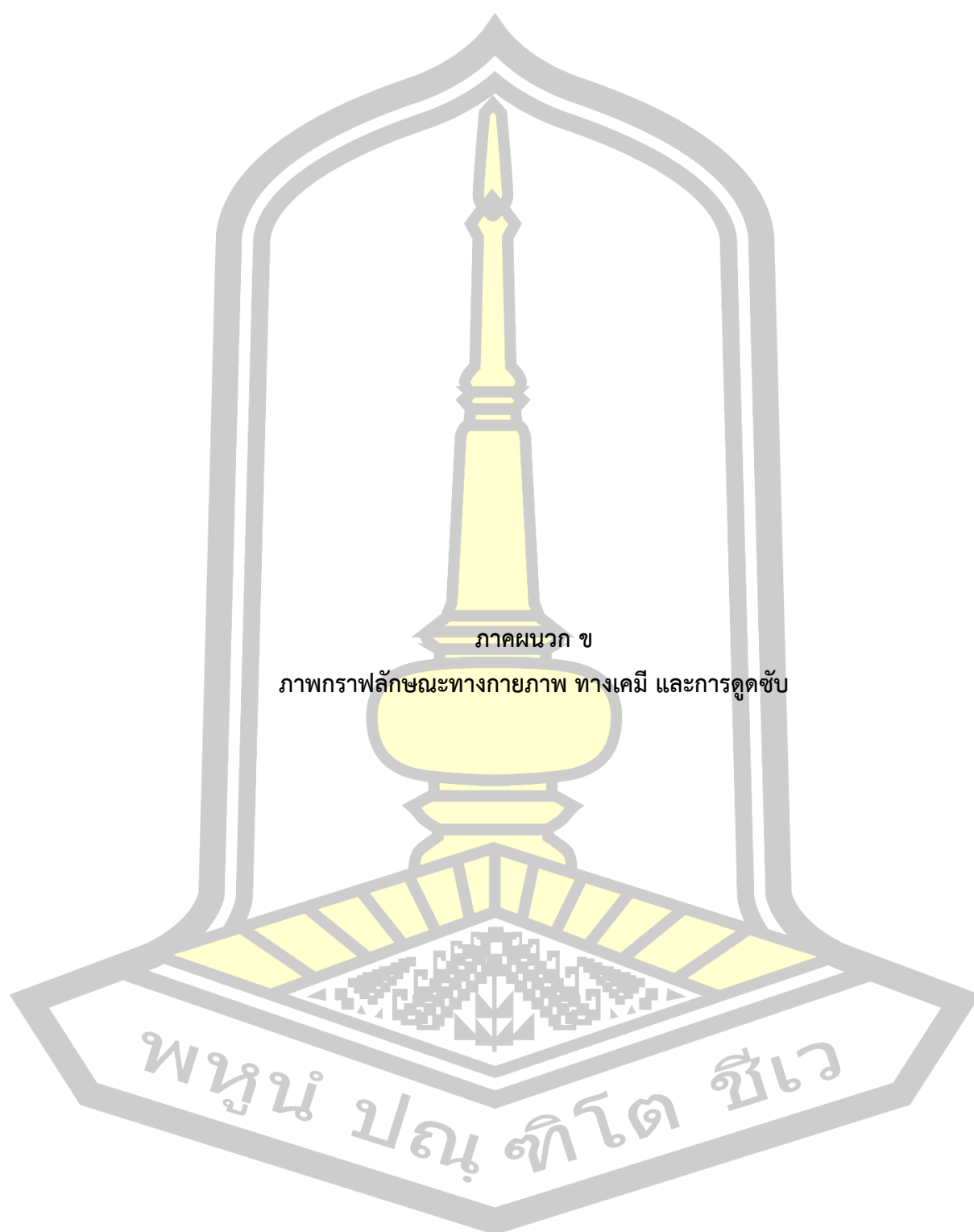
⁶Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Burapha University, Chonburi, 20131, Thailand

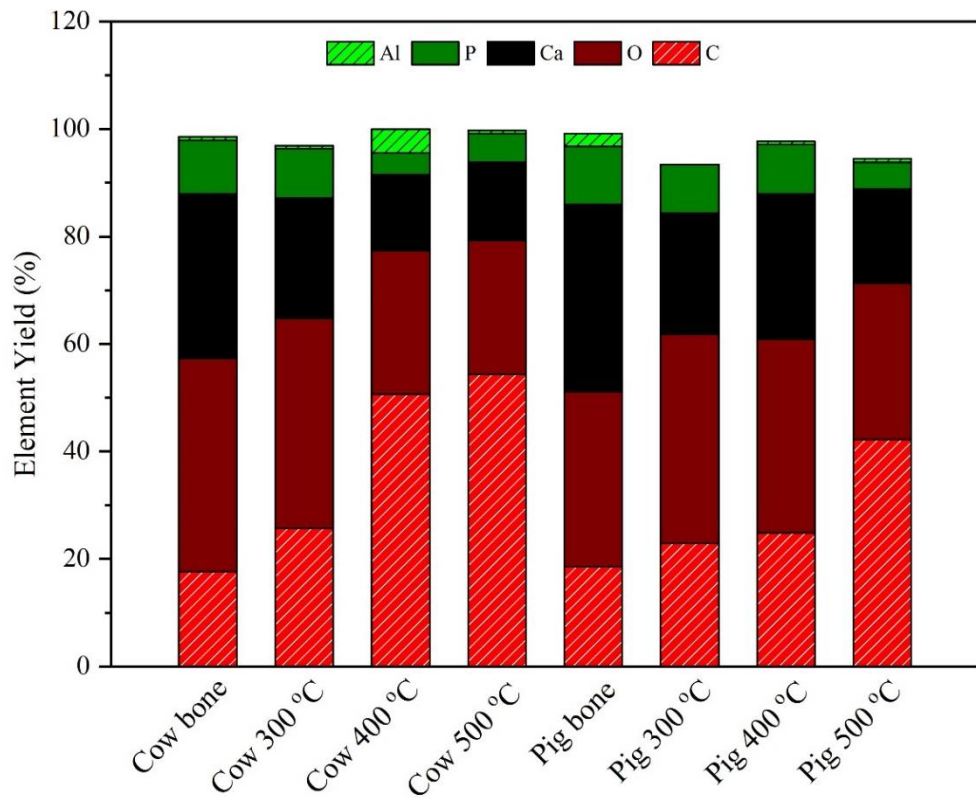
*Corresponding Author: Surachai Wongcharee (Email: surachai.w@msu.ac.th)

Abstract

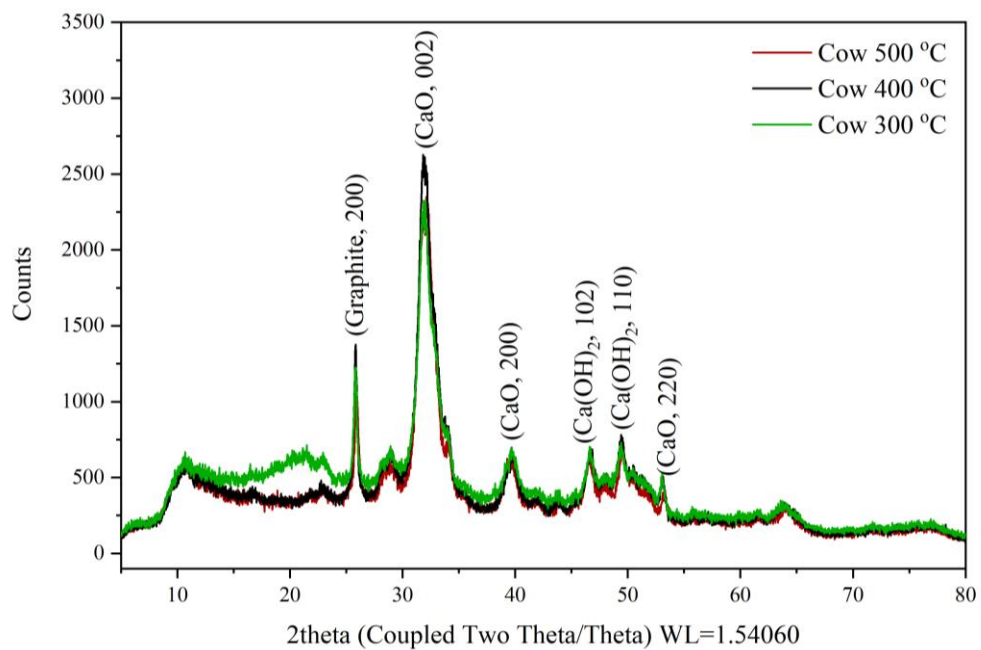
While biochar holds promise as a sustainable soil amendment, it is essential to consider factors such as the quality and source of biochar, appropriate application rates, and other application conditions for optimal results. Factors such as the availability and cost of biomass feedstocks, the scalability of biochar production, and the need for further research and demonstration projects have contributed to its slow adoption rate. Waste bone from abattoirs is one choice of raw material in the production of biochar via a modified anaerobic furnace with a slow pyrolysis process. The results found that both physical and chemical characteristics of pig and cow biochar have a specific surface area of about 77.3060 m²/g and 77.0285 m²/g respectively and had C and Ca as a main composition. The isotherm analysis was characterized and found type III isotherm, which indicated mesoporous and macroporous in nature. The functional group indicated hydroxyl (-OH), carboxyl (-COOH), carbonyl (C=O), aliphatic C-H bonds and aromatic C=C bonds that are similar to the carbon properties. It can be summarized that these novel bone char can be applied to deal with water and wastewater in all applications.

Keywords: Cow and Pig Bone, Bone Char, Biochar, slow pyrolysis

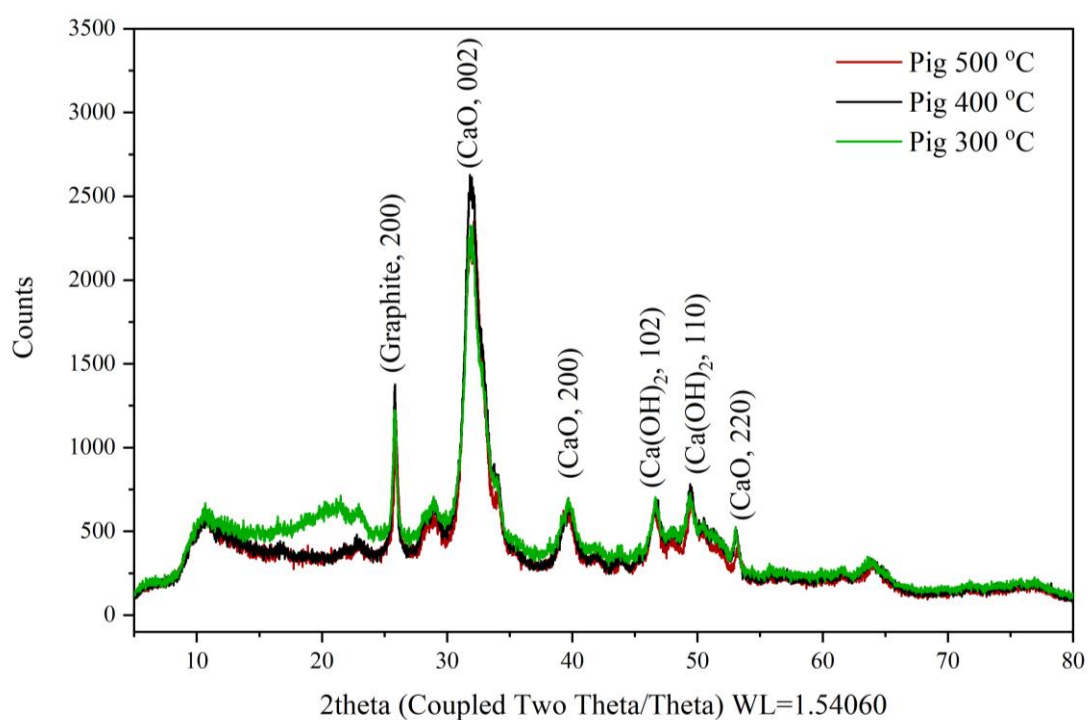




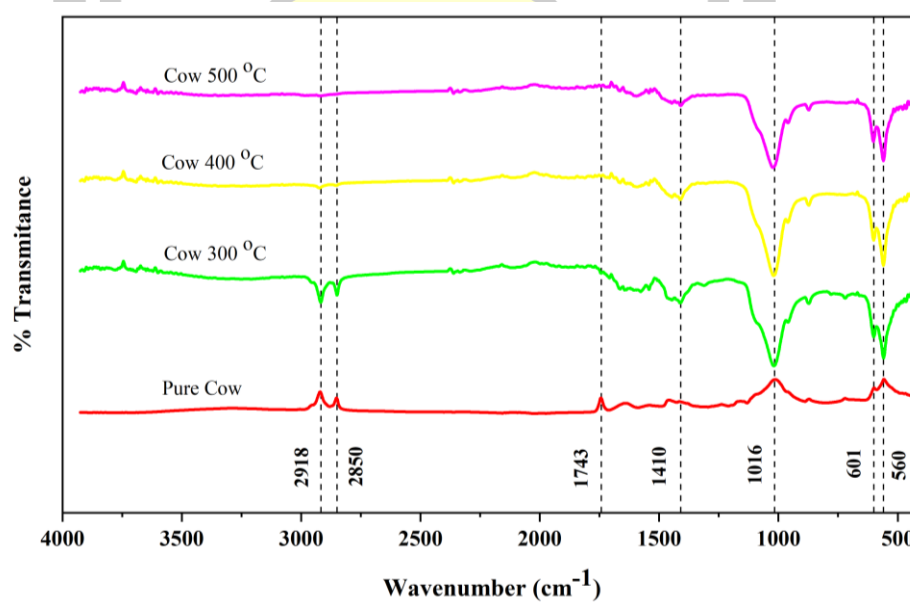
ภาพประกอบ 26 แสดงองค์ประกอบของธาตุของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยเทคนิค EDX



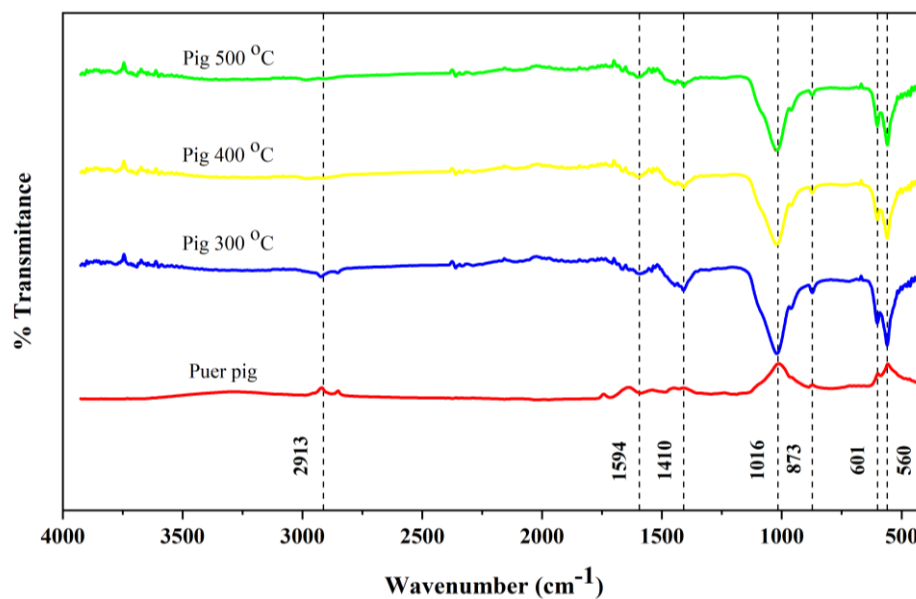
ภาพประกอบ 27 ภาพลักษณะ XRD ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C



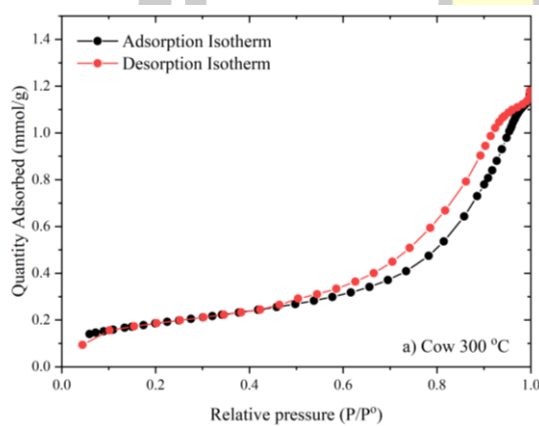
ภาพประกอบ 28 ภาพลักษณะ XRD ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C



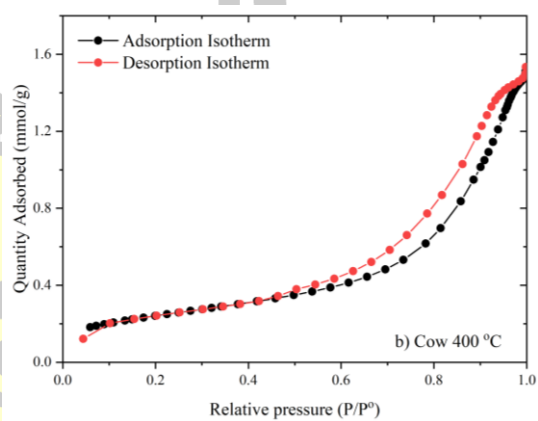
ภาพประกอบ 29 ลักษณะ FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว



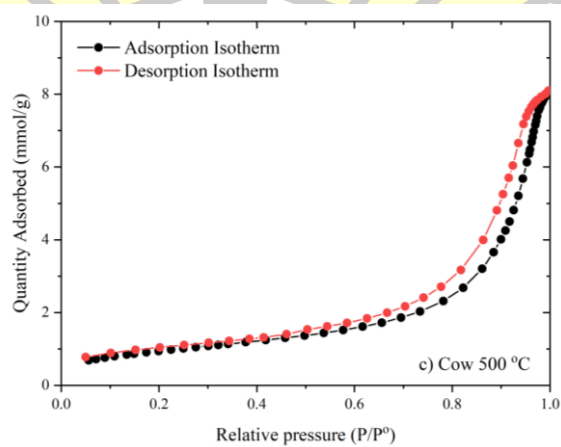
ภาพประกอบ 30 ลักษณะ FTIR ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู



(ก)



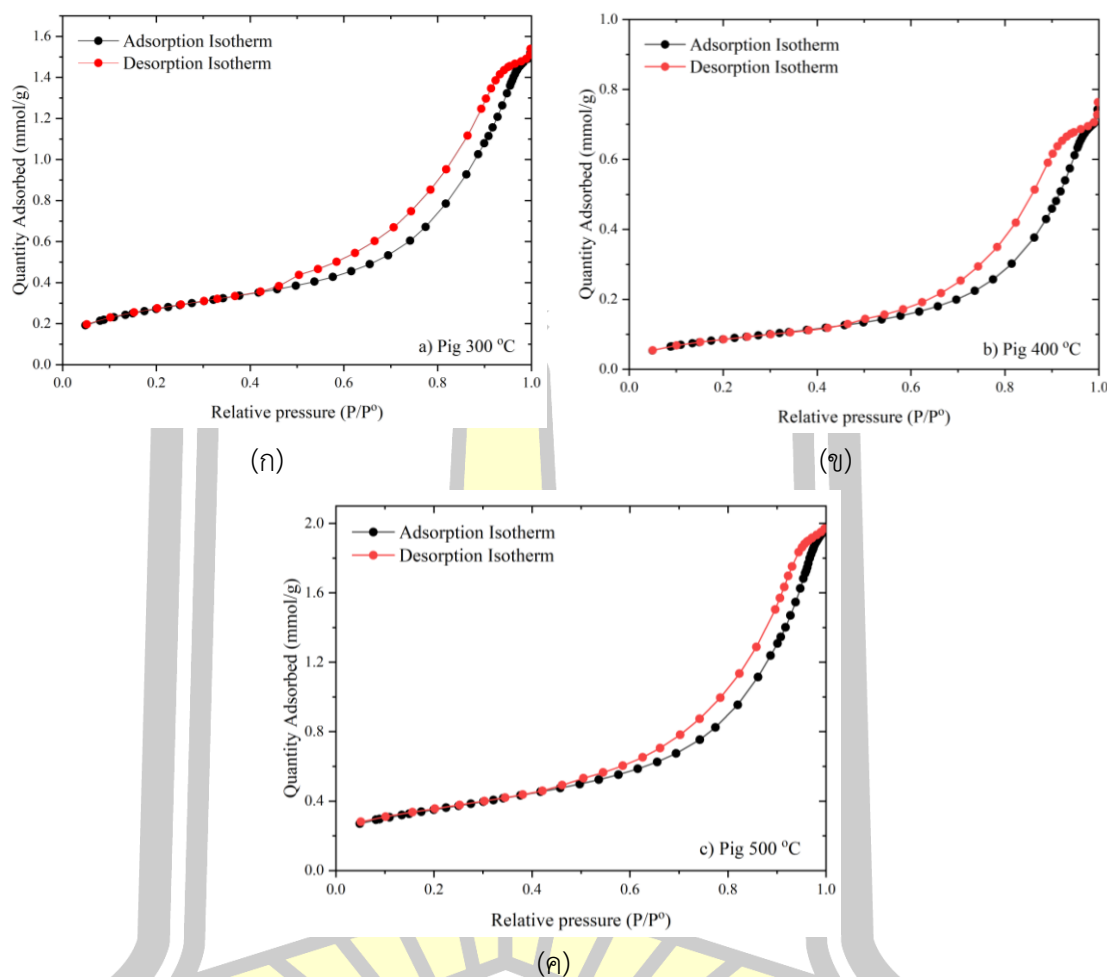
(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 31 ไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ร่วจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

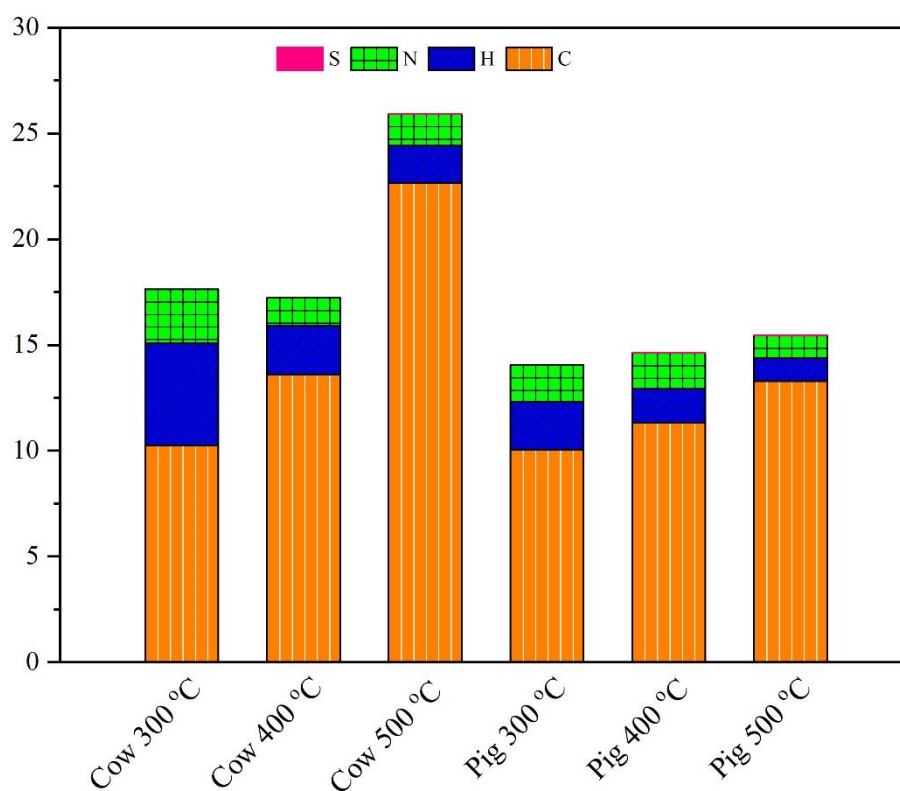
: ก) ถ่านไบโอชาร์ร่วที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ถ่านไบโอชาร์ร่วที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ถ่านไบโอชาร์ร่วที่อุณหภูมิ 500 °C



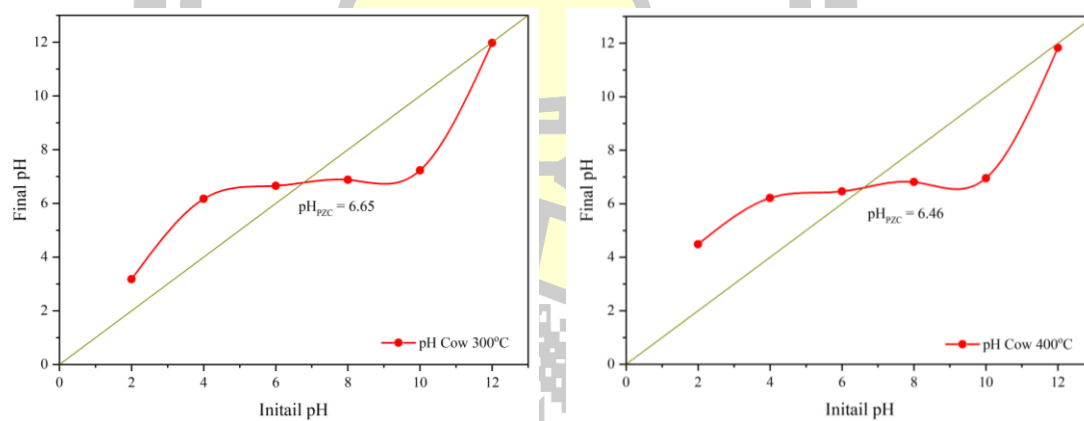
ภาพประกอบ 32 ไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์หมูจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

: ก) ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C

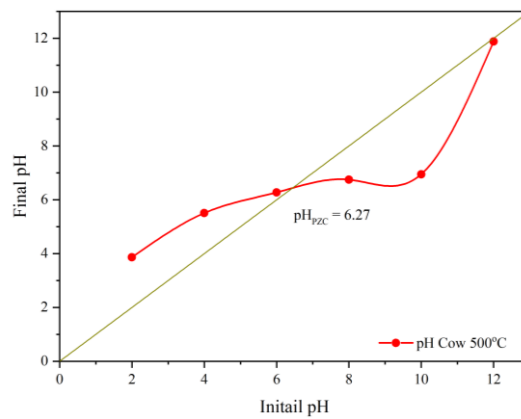
พหุ ประถม วิชา



ภาพประกอบ 33 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู

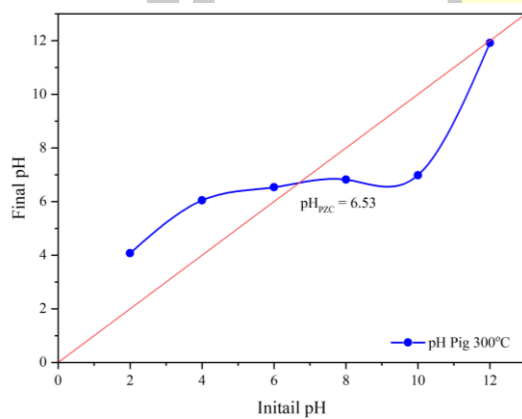


พูน ปณ ทิโต ชีเว

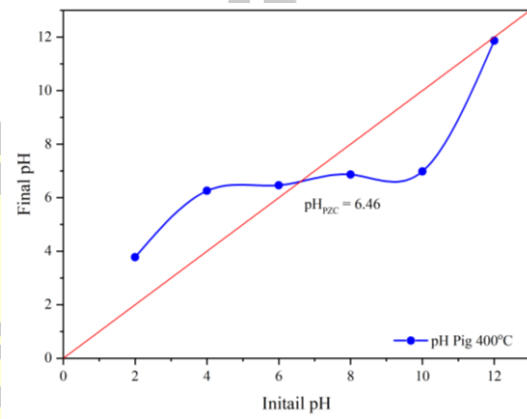


(ค)

ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงผล Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัว :
 ก) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์วัวที่อุณหภูมิ 500 °C

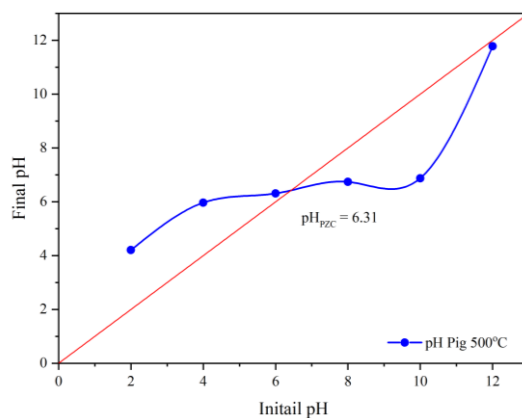


(ก)



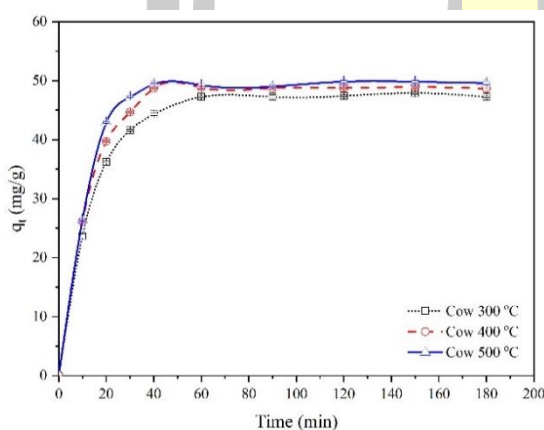
(ข)



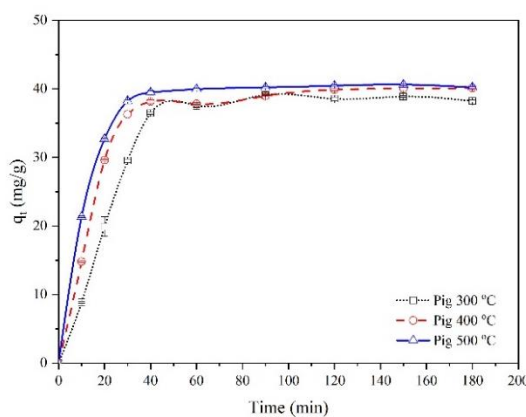


(ค)

ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงผล Point of zero charge ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกหมู : ก) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C ข) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) ค่า pH_{pzc} ของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C



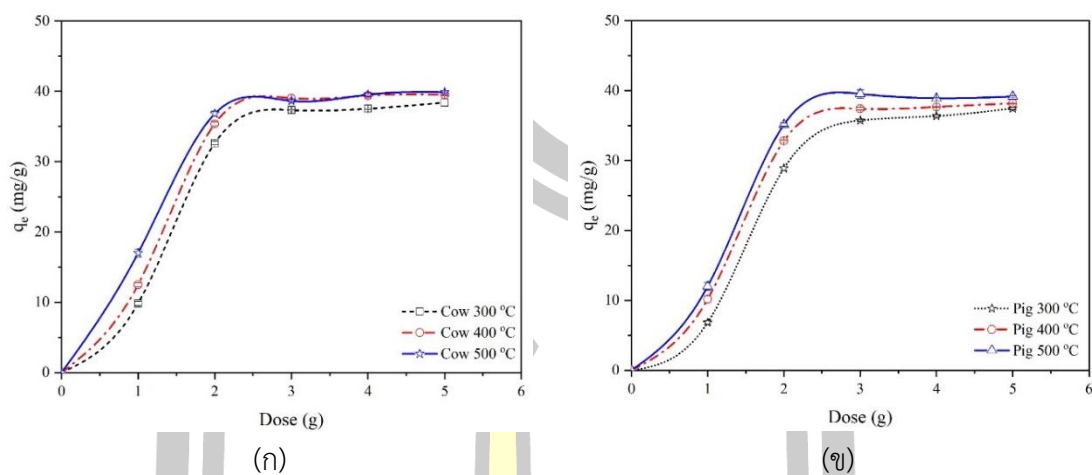
(ก)



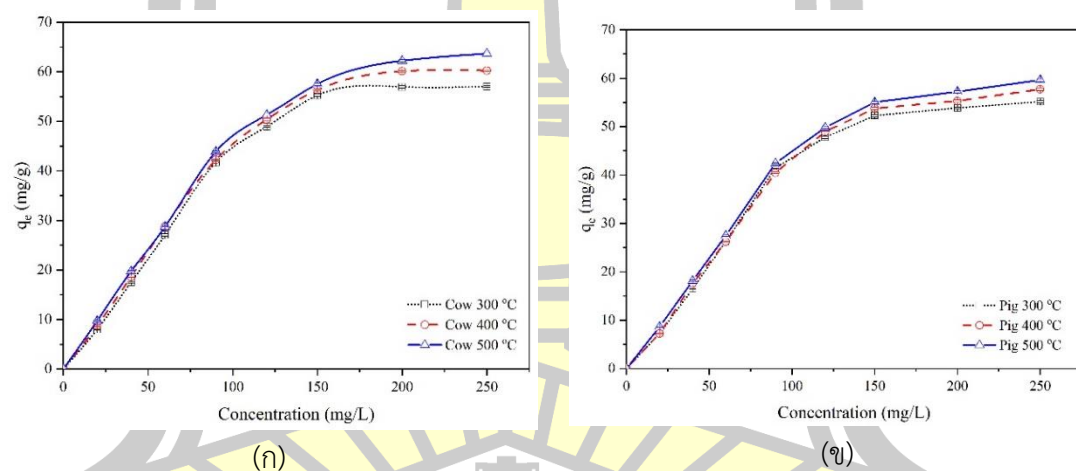
(ข)

ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับทองแดง: ก) ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับถ่านไบโอชาร์วัว และ ข) ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับถ่านไบโอชาร์หมู

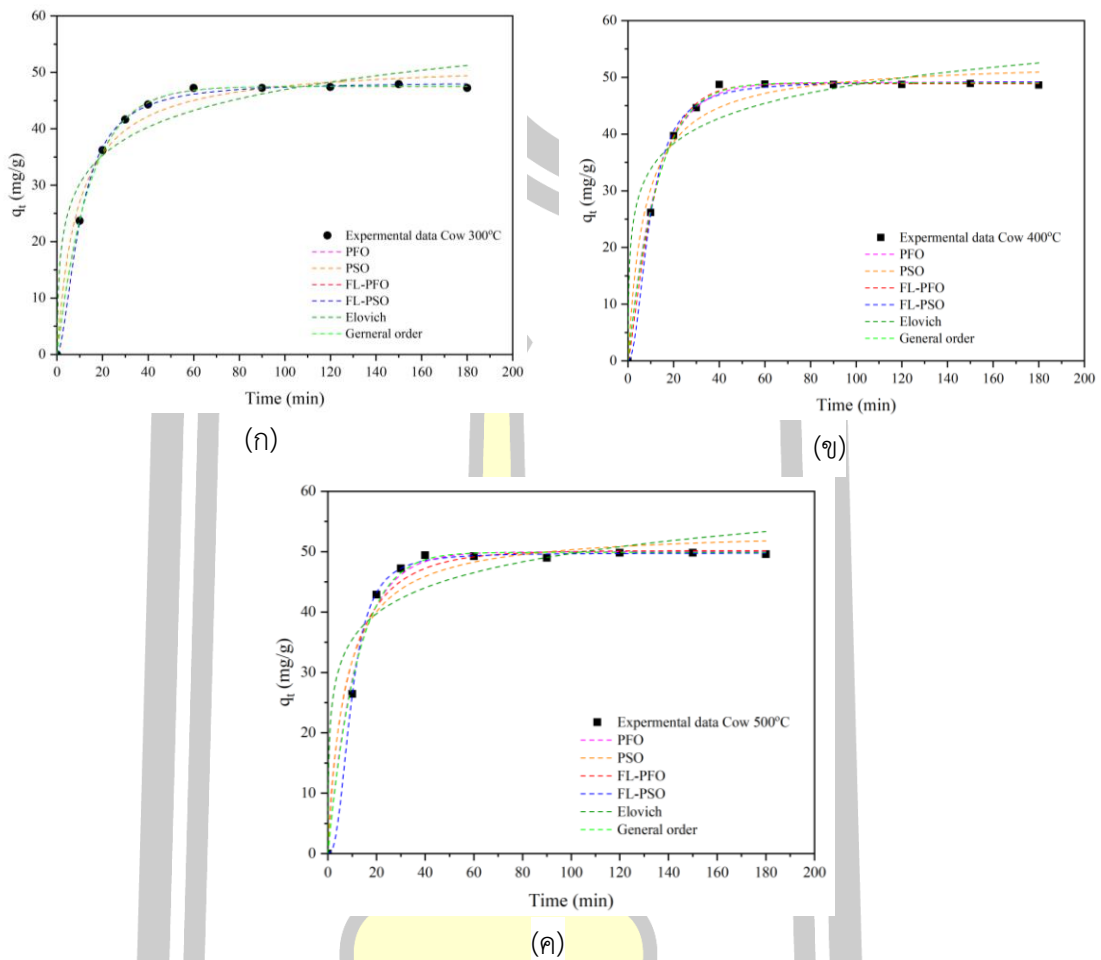
พหุ ประถม ชาติ ชีวะ



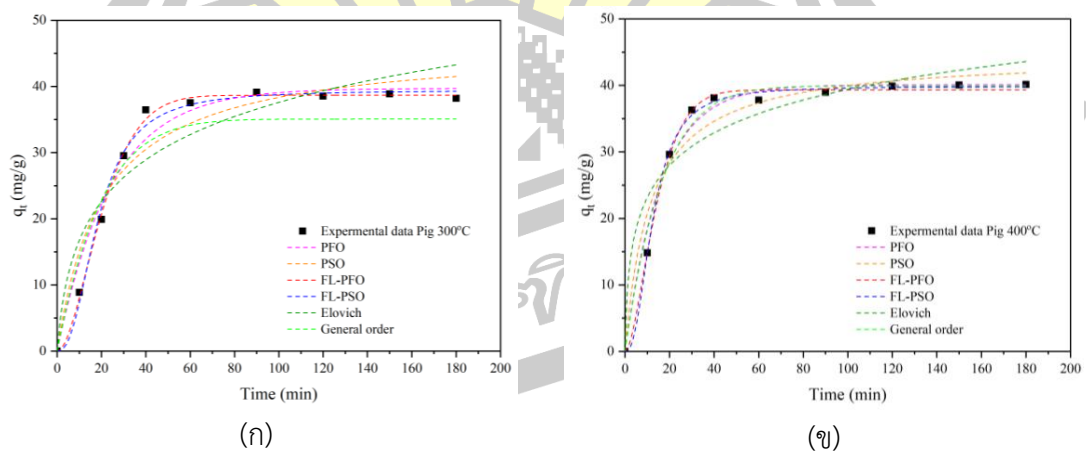
ภาพประกอบ 37 ภาพแสดงปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู: ก) ปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C และ ข) ปริมาณตัวดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

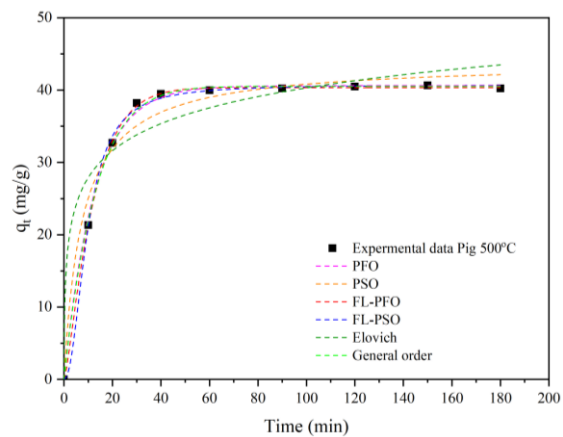


ภาพประกอบ 38 ภาพแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทองแดงของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า : ก) ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C และ ข) ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมูที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C



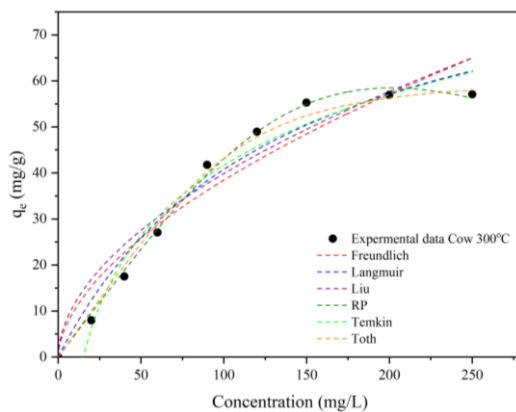
ภาพประกอบ 39 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัว : ก) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์วัว 300 °C ข) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์วัว 400 °C และ ค) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์วัว 500 °C



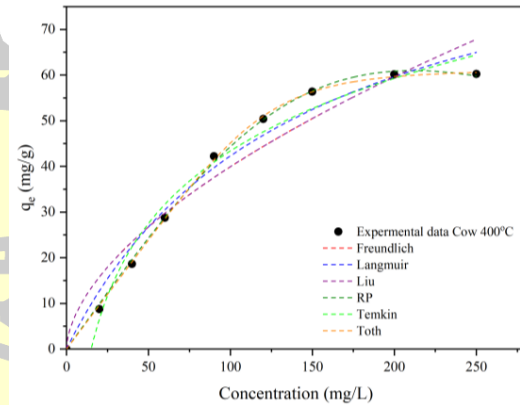


(ค)

ภาพประกอบ 40 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก
 กระดุกหมู : ก) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C ข) แบบจำลอง
 จลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C และ ค) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์หมู
 500 °C

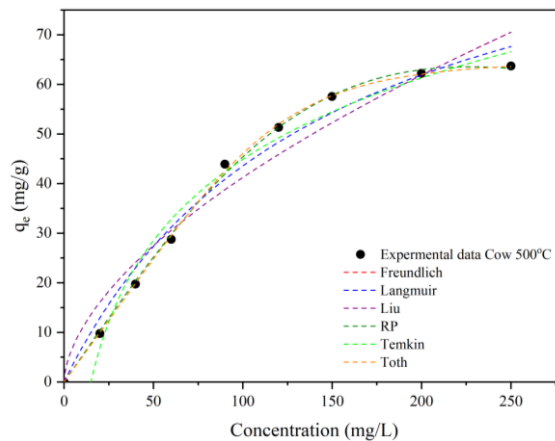


(ก)



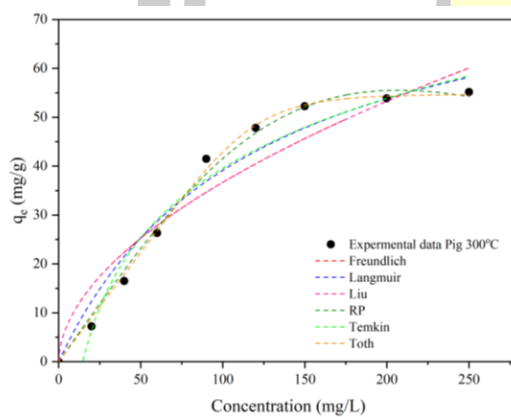
(ข)



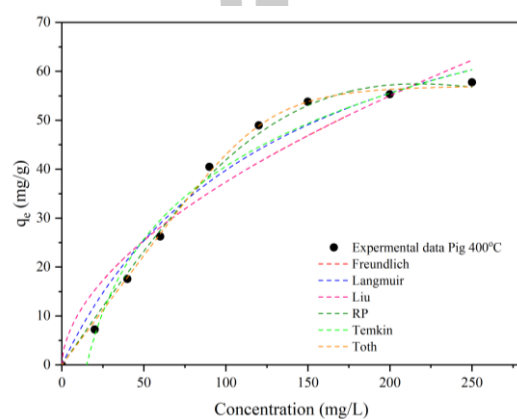


(ค)

ภาพประกอบ 41 ภาพแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว : ก) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 300 °C ข) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 °C

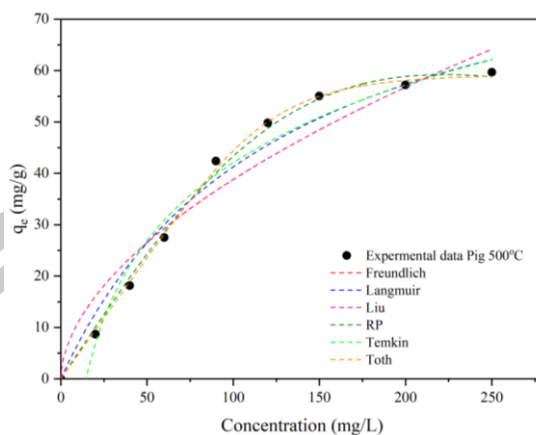


(ก)



(ข)

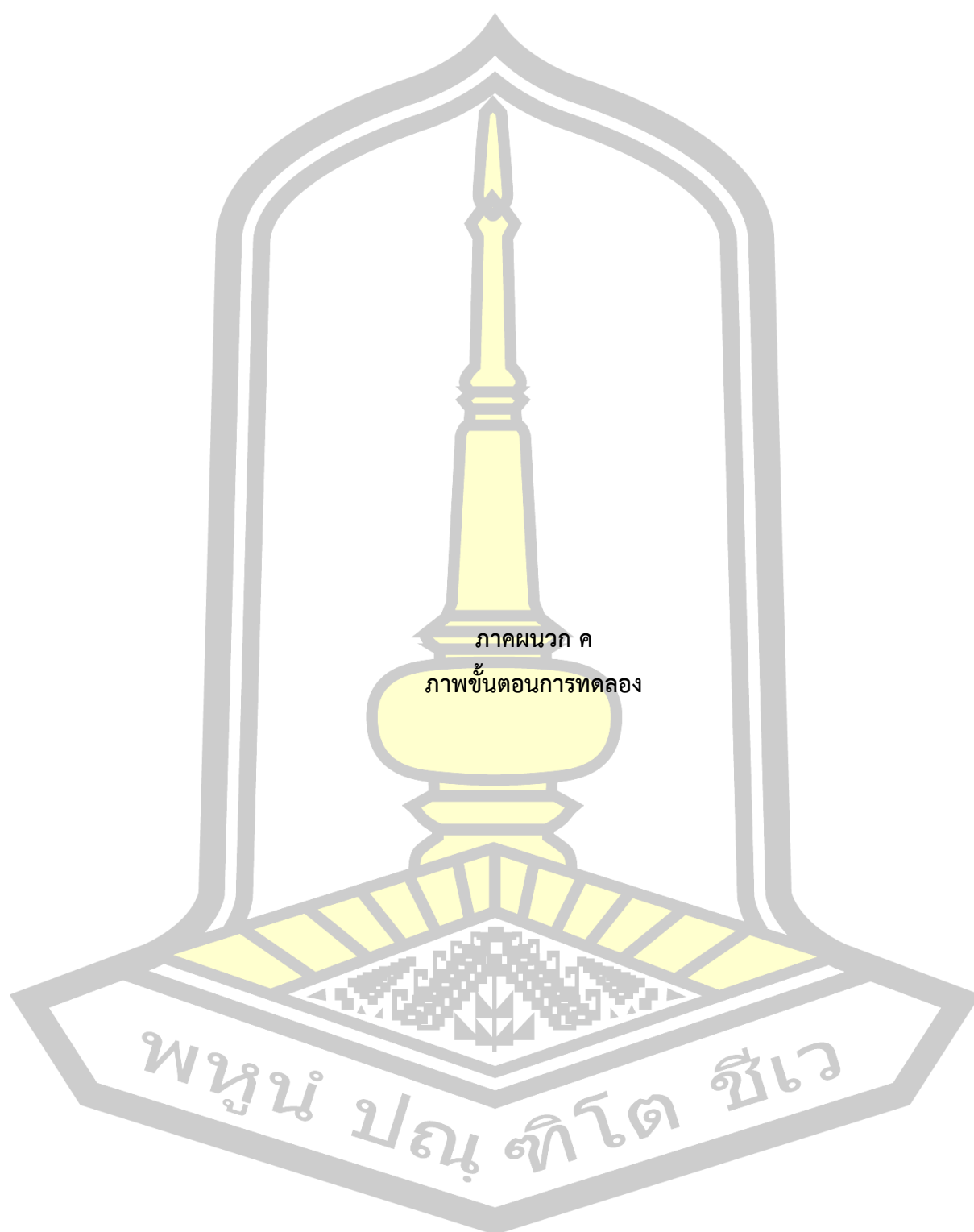
พูน ปณ ทิโต ชีเว



(ค)

ภาพประกอบ 42 ภาพแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก
 กระดุกหมู : ก) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 300 °C ข)
 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 400 °C และ ค) แบบจำลองไอโซ
 เทอมการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมูที่อุณหภูมิ 500 °C

พูน ปณ จิโต ชีเว



ขั้นตอนการทำถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวและหมู



ภาพประกอบ ค1 กระดูกวัวและหมูที่ทำความสะอาดและตากแห้งแล้ว



ภาพประกอบ ค2 เตาที่ใช้เผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซีเตรท



ภาพประกอบ ค3 การชั่งกรดซิตริกและคอปเปอร์ไนเตรท



ภาพประกอบ ค4 การเตรียมกรดซิตริก

ขั้นตอนการเตรียม Standard



ภาพประกอบ ค5 การเตรียม Standard



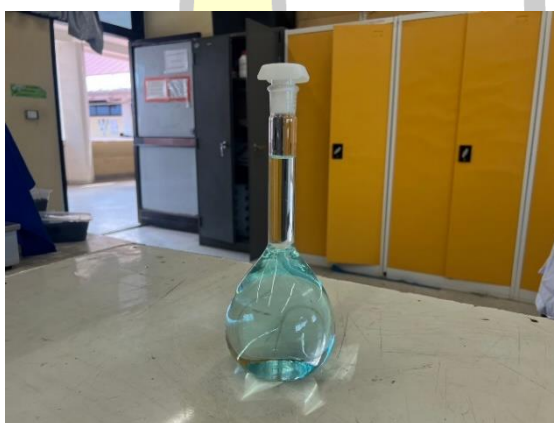
ภาพประกอบ ค6 ตัวอย่าง Standard

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ ค7 นำ Standard วิเคราะห์ UV-vis Spectroscopy ด้วยเครื่องสเปกโตร

ขั้นตอนการทดลองหาปริมาณถ่าน เวลา ความเข้มข้นของโลหะหนักทองแดงที่เหมาะสมต่อการ
ดูดซับ



ภาพประกอบ ค8 เตรียมกรดซิตริกและคอปเปอร์ไนเตรท



ภาพประกอบ ค9 ชั่งถ่านไบโอชาร์วีวและหนู



ภาพประกอบ ค10 เติมถ่านที่ซึ่งใส่ตัวอย่าง



ภาพประกอบ ค11 กรองตัวอย่าง



ภาพประกอบ ค12 นำ Standard วิเคราะห์ UV-vis Spectroscopy ด้วยเครื่องสเปกโตร

ขั้นตอนการทดลองค่า pH_{PZC}



ภาพประกอบ ค13 เตรียมกรดซิตริกและคอปเปอร์ไนเตรท



ภาพประกอบ ค14 เตรียมสารละลายคอปเปอร์ไนเตรทให้ได้ความเป็นกรด-เบส



ภาพประกอบ ค15 ชั่งถ่านไบโอชาร์ร่วนและหมู



ภาพประกอบ ค16 เติมถ่านใส่ตัวอย่าง



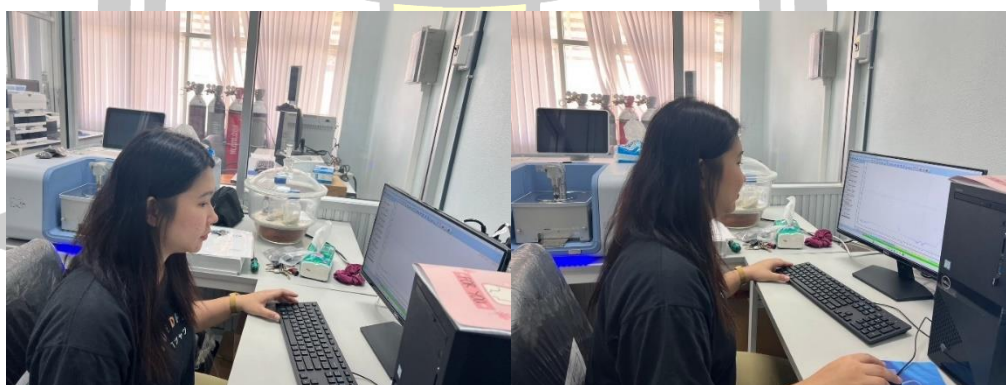
ภาพประกอบ ค17 วัด pH หลังการทดลอง

พูน ปณ ภัโต ชีเว

ขั้นตอนการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์วีวและหมู
ขั้นตอนการวิเคราะห์ FTIR



ภาพประกอบ ค18 นำถ่านใส่ลงในเครื่องวิเคราะห์ FTIR



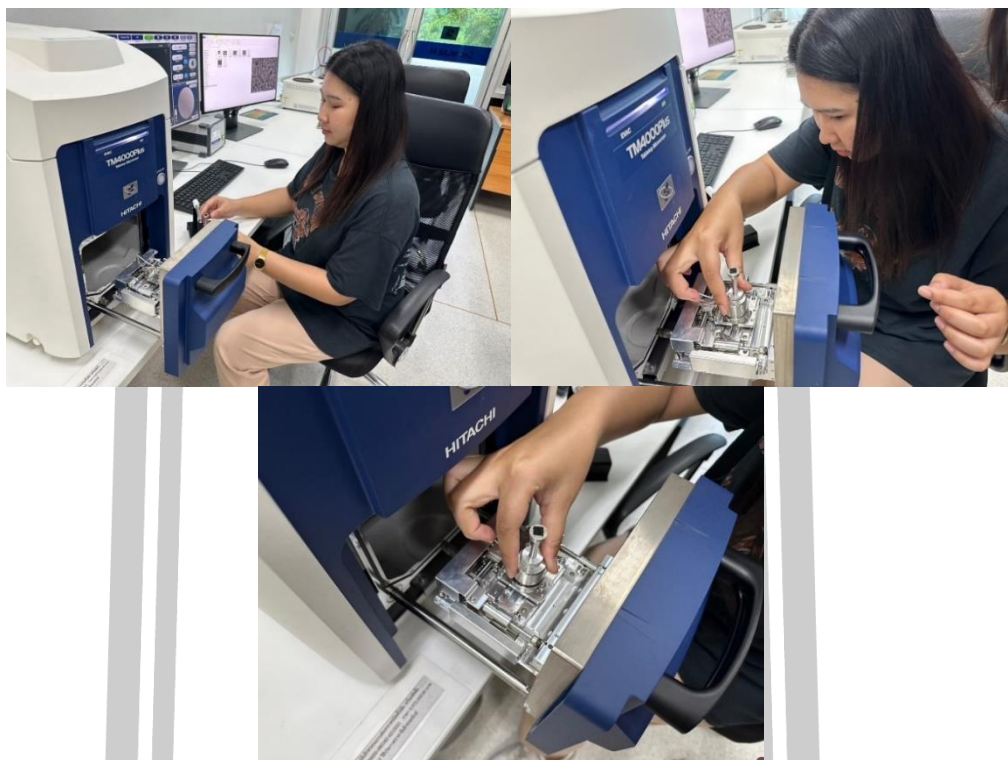
ภาพประกอบ ค19 วิเคราะห์ค่า FTIR

ขั้นตอนการวิเคราะห์ SEM-EDX



ภาพประกอบ ค20 เตรียมถ่านไบโอชาร์

พูน ปณ ภิโต ชีเว



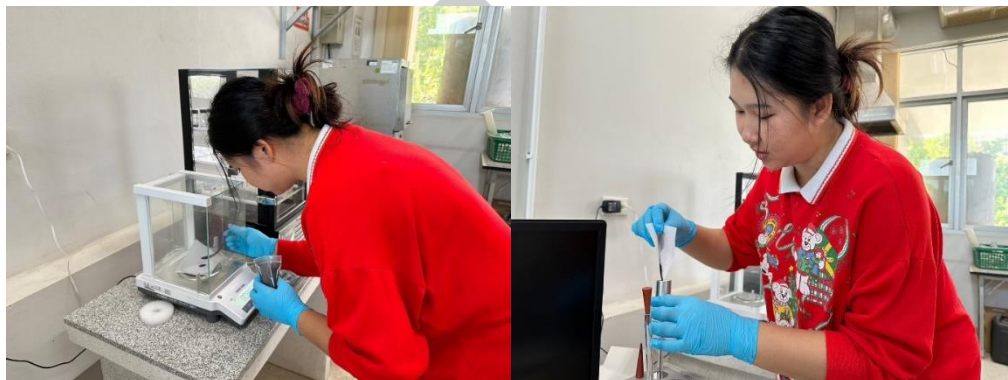
ภาพประกอบ ค21 นำถ่านไบโอชาร์เข้าเครื่องวิเคราะห์ SEM-EDX



ภาพประกอบ ค22 วิเคราะห์ค่า SEM-EDX

พูน ปณ ทิโต ชีเว

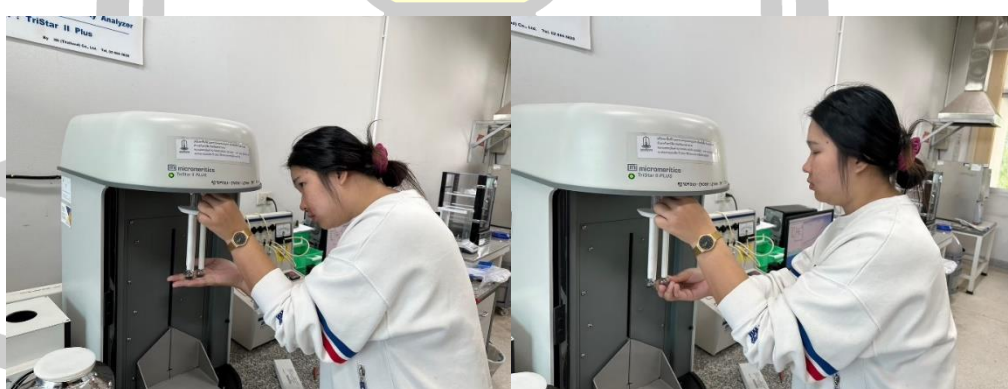
ขั้นตอนการวิเคราะห์ BET



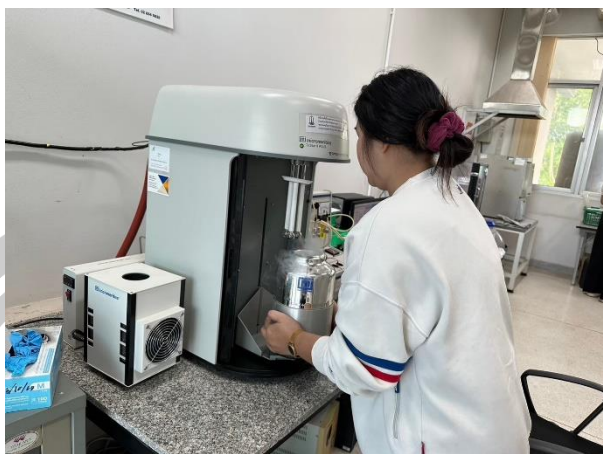
ภาพประกอบ ค23 ชั่งถ่านไปโอชาร์วีวและหมู



ภาพประกอบ ค24 นำถ่านใส่เครื่องตรวจเช็คความพร้อมก่อนวิเคราะห์



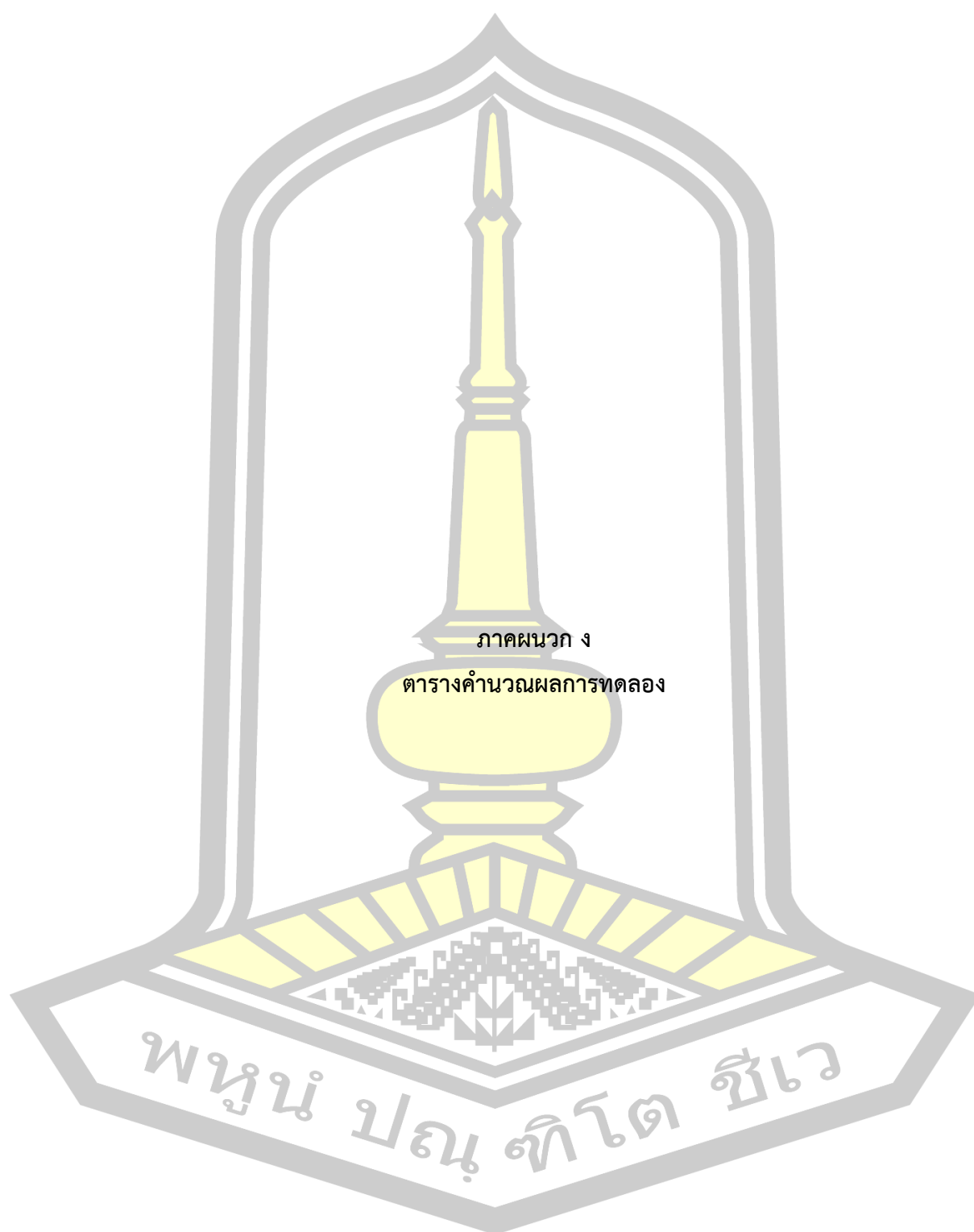
ภาพประกอบ ค25 ใส่ตัวอย่างในเครื่องวิเคราะห์ BET



ภาพประกอบ ค26 เต็มไนโตรเจนเหลว



ภาพประกอบ ค27 วิเคราะห์ผล BET



ตารางแสดงผลค่าวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไบโอชาร์รีวและหมู

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัวและกระดุกหมู

อุณหภูมิ	ถ่านไบโอชาร์รีว			ถ่านไบโอชาร์หมู		
	300 °C	400 °C	500 °C	300 °C	400 °C	500 °C
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	14.9827	21.9863	77.306	19.4775	27.6782	77.029
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	0.0246	0.03957	0.05177	0.2782	0.05144	0.6777
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (nm)	9.4202	10.5653	13.509	9.7940	10.5653	14.451

ตารางที่ 2 แสดงค่าองค์ประกอบของธาตุ CHNS ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกวัวและหมู ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

วัสดุดูดซับ	คาร์บอน (C) (% Wt)	ไฮโดรเจน (H) (% Wt)	ไนโตรเจน (N) (% Wt)	ซัลเฟอร์ (S) (% Wt)
ถ่านไบโอชาร์รีว 300 °C	10.254	4.816	2.565	N.D.
ถ่านไบโอชาร์รีว 400 °C	13.618	2.300	1.476	N.D.
ถ่านไบโอชาร์รีว 500 °C	22.674	1.764	1.316	0.008
ถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C	10.053	2.256	1.734	N.D.
ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C	11.330	1.606	1.682	0.011
ถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C	13.286	1.104	1.064	0.004

ตารางคำนวณผลการทดลอง

ตารางที่ 3 ตารางคำนวณผลค่า pH ของถ่านไบโอชาร์รีว

รีว	300		400		500	
pH	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
2	3.18	0.012	4.49	0.006	3.87	0.006
4	6.17	0.010	6.22	0.006	5.51	0.010
6	6.66	0.015	6.46	0.015	6.28	0.006
8	6.88	0.012	6.81	0.006	6.75	0.010
10	7.23	0.012	6.95	0.012	6.95	0.006

12	11.97	0.006	11.83	0.010	11.88	0.012
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ตารางที่ 4 ตารางคำนวณผลค่า pH ของถ่านไบโอชาร์หมู

หมู	300		400		500	
pH	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
2	4.07	0.015	3.78	0.015	4.21	0.012
4	6.05	0.015	6.26	0.015	5.97	0.010
6	6.53	0.006	6.47	0.015	6.31	0.015
8	6.82	0.010	6.87	0.012	6.74	0.006
10	6.98	0.012	6.98	0.010	6.87	0.015
12	11.92	0.006	11.86	0.006	11.78	0.015

ตารางที่ 5 ตารางคำนวณผลเวลาในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์วัว

วัว	300		400		500	
เวลา	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	23.6753	0.3829	26.1817	0.1447	26.4323	0.1447
20	36.2071	0.1447	39.7160	0.1447	42.8907	0.1447
30	41.6375	0.1447	44.6451	0.1447	47.2350	0.1447
40	44.3109	0.2506	48.7388	0.1447	49.4072	0.1447
60	47.2350	0.1447	48.8224	0.2506	49.2401	0.1447
90	47.2350	0.2894	48.7388	0.1447	48.9895	0.1447
120	47.4021	0.1447	48.7388	0.1447	49.8249	0.2506
150	47.9034	0.1447	48.9059	0.1447	49.8249	0.2506
180	47.2350	0.1447	48.6553	0.1447	49.5743	0.2506

ตารางที่ 6 ตารางคำนวณผลเวลาในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมู

หมู	300	400	500
-----	-----	-----	-----

เวลา	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	8.8879	0.1447	14.8196	0.1447	21.3361	0.1447
20	19.9158	1.4470	29.6070	0.1447	32.6982	0.1447
30	29.5235	0.2506	36.2906	0.0000	38.2122	0.1447
40	36.4577	0.1447	38.1286	0.2894	39.4653	0.2894
60	37.5438	0.2506	37.7944	0.2506	39.9666	0.1447
90	39.1312	0.1447	38.9641	0.1447	40.2172	0.1447
120	38.5463	0.2506	39.8831	0.1447	40.4679	0.1447
150	38.8805	0.1447	40.0501	0.2506	40.6350	0.1447
180	38.2122	0.1447	40.1337	0.1447	40.2172	0.1447

ตารางที่ 7 ตารางคำนวณผลความเข้มข้นของโลหะหนักทองแดงในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์วัว

วัว	300		400		500	
ความเข้มข้น	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	7.9869	0.1447	8.7388	0.1447	9.7414	0.1447
40	17.4857	0.1447	18.6553	0.1447	19.7414	0.1447
60	27.0679	0.2506	28.7388	0.1447	28.7388	0.1447
90	41.7337	0.2894	42.2350	0.1447	43.9059	0.1447
120	48.9641	0.1447	50.3843	0.2894	51.3033	0.2506
150	55.2754	0.2506	56.3615	0.1447	57.5311	0.2506
200	56.9663	0.2506	60.1410	0.1447	62.2297	0.2506
250	57.0699	0.1447	60.2446	0.1447	63.6700	0.2506

ตารางที่ 8 ตารางคำนวณผลความเข้มข้นของโลหะหนักทองแดงในการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หมู

หมู	300		400		500	
ความเข้มข้น	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

20	7.2350	0.1447	7.2350	0.1447	8.6553	0.1447
40	16.4831	0.1447	17.5692	0.2506	18.1540	0.1447
60	28.4130	3.6321	26.2325	0.1447	27.4857	0.1447
90	41.4831	0.1447	40.4806	0.1447	42.4021	0.1447
120	47.7944	0.2506	48.9641	0.1447	49.7995	0.2506
150	52.2678	0.2506	53.7716	0.2506	55.0247	0.2506
200	53.8752	0.1447	55.2954	0.2894	57.2170	0.2506
250	55.1484	0.2506	57.7383	0.2894	59.6598	0.2506

ตารางที่ 9 ตารางคำนวณปริมาณถ่านไบโอชาร์วัวในการดูดซับ

วัว	300		400		500	
ปริมาณถ่าน (กรัม)	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	9.8356	0.2894	12.5090	0.2894	17.0205	0.5788
2	32.6547	0.2506	35.4117	0.2506	36.8320	0.3829
3	37.3649	0.0965	39.0358	0.0965	37.6991	0.0965
4	37.5478	0.0724	39.4276	0.0724	39.5529	0.2894
5	38.4262	0.0000	39.5289	0.1003	39.8965	0.0579

ตารางที่ 10 ตารางคำนวณปริมาณถ่านไบโอชาร์หมูในการดูดซับ

หมู	300		400		500	
ปริมาณถ่าน (กรัม)	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	6.8280	0.2894	10.1698	0.5013	12.0078	0.5788
2	28.8952	0.2506	32.8218	0.1447	35.1611	0.2506
3	35.7497	0.0965	37.4206	0.1929	38.2003	0.0965
4	36.3782	0.1253	37.6731	0.0724	38.9263	0.0724
5	37.4570	0.1531	38.1922	0.0579	39.1614	0.1158

ตารางที่ 11 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว

แบบจำลองจลนพลศาสตร์	ถ่านไบโอชาร์ ว้าว 300 °C	ถ่านไบโอชาร์ว้าว 400 °C	ถ่านไบโอชาร์ ว้าว 500 °C
Pseudo first order (PFO)			
q_e	47.5200	49.1219	49.9750
k_1	0.0700	0.0803	0.0860
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	0.0992	0.5206	1.5892
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	0.7936	4.1652	12.7141
R^2	0.9996	0.99817	0.9946
R^2_{adj}	0.9995	0.9979	0.9939
Pseudo second order (PSO)			
q_e	51.9395	53.0306	53.7551
k_2	0.0021	0.0025	0.0027
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	3.8851	6.4723	9.0984
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	31.0839	51.7787	72.7868
R^2	0.9855	0.9772	0.9692
R^2_{adj}	0.9837	0.9743	0.9653
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)			
q_e	47.4948	48.8882	50.1667
k_1	0.0676	0.0263	0.1000
α	1.0123	1.3025	0.8633
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	0.1101	0.2674	6.3764
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	0.7703	1.8719	44.6353
R^2	0.9996	0.9991	0.9811
R^2_{adj}	0.9995	0.9989	0.9757
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)			
q_e	48.2643	49.3419	49.7716
k_2	3.4791	1.9357	6.3868
α	1.7502	2.0635	2.5493

<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	0.3016	0.7421	0.1933
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	2.1114	5.1949	1.3531
<i>R²</i>	0.9990	0.9977	0.9994
<i>R²_{adj}</i>	0.9987	0.9970	0.9926
Elovich			
α_{ϵ}	45.7441	119.6532	191.5693
β_{ϵ}	0.1372	0.1543	0.1617
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	13.7738	18.0203	21.6704
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	110.1909	144.1629	173.3637
<i>R²</i>	0.9486	0.9365	0.9267
<i>R²_{adj}</i>	0.9422	0.9286	0.9175
General (rational) order			
<i>q_e</i>	47.5023	49.0169	49.8762
<i>k_r</i>	0.0723	0.1013	0.1070
<i>n</i>	0.9900	0.9272	0.9324
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	4.4517	0.3517	1.3419
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	31.1621	2.4620	9.3934
<i>R²</i>	0.9813	0.9989	0.9960
<i>R²_{adj}</i>	0.9995	0.9986	0.9949

ตารางที่ 12 ตารางแสดงพารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก กระดุกหมู

แบบจำลองจลนพลศาสตร์	ถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C
Pseudo first order (PFO)			
<i>q_e</i>	39.7063	40.0766	40.6106
<i>k₁</i>	0.0412	0.0621	0.0803
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	6.5298	3.2024	0.4303
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	52.2389	25.6198	3.4429
<i>R²</i>	0.9714	0.9845	0.9977

R^2_{adj}	0.9679	0.9825	0.9975
Pseudo second order (PSO)			
q_e	46.2868	44.5485	43.8919
k_2	0.0010	0.0016	0.0030
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	14.1703	8.9433	4.6549
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	113.3624	71.5468	37.2395
R^2	0.9381	0.9567	0.9761
R^2_{adj}	0.9304	0.9513	0.9731
Fractal-like pseudo first order (FL-PFO)			
q_e	38.6739	39.3153	40.3371
k_1	0.0019	0.0056	0.0219
α	1.8768	1.7427	1.3722
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	0.6503	0.5903	0.0754
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	4.5524	4.1323	0.5277
R^2	0.9975	0.9975	0.9996
R^2_{adj}	0.9968	0.9967	0.9995
Fractal-like pseudo second order (FL-PSO)			
q_e	39.4340	39.8434	40.7255
k_2	2.3129	5.6764	1.9038
α	2.4011	2.4124	2.1427
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	1.8325	0.4405	0.3064
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	12.8276	3.0838	2.1452
R^2	0.9930	0.9981	0.9986
R^2_{adj}	0.9910	0.9976	0.9982
Elovich			
$\alpha_{(e)}$	4.4331	17.5324	93.4211
$\beta_{(e)}$	0.1019	0.1397	0.1849
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	24.9222	18.9277	12.6574
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	199.3776	151.4221	101.2672
R^2	0.8911	0.9084	0.9350

R^2_{adj}	0.8775	0.8970	0.9269
General (rational) order			
q_e	35.0760	39.8974	40.5153
k_r	0.0739	0.0834	0.0999
n	0.8882	0.9057	0.9272
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	18.2407	3.0515	0.2795
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	127.6855	21.3610	1.9568
R^2	0.9303	0.9870	0.9987
R^2_{adj}	0.9101	0.9834	0.9983

ตารางที่ 13 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก กระดาษกาว

แบบจำลองไอโซเทอม	ถ่านไบโอชาร์ร่ว 300 °C	ถ่านไบโอชาร์ร่ว 400 °C	ถ่านไบโอชาร์ร่ว 500 °C
Freundlich isotherm			
k_f	2.7547	2.7916	2.7831
n_f	1.7472	1.7307	1.7083
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	37.4955	31.9816	27.5454
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	262.4689	223.8716	192.8182
R^2	0.9334	0.9469	0.8571
R^2_{adj}	0.9239	0.9394	0.9510
Langmuir isotherm			
q_m	95.6487	101.1140	106.9265
k_l	0.0074	0.0071	0.0068
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	17.3045	12.9855	10.2034
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	121.1319	90.8988	71.4239
R^2	0.9692	0.9784	0.9818
R^2_{adj}	0.9649	0.9754	0.9815
Liu isotherm			
q_m	2.6531	1.3694	1.3645

k_g	0.0154	1.3280	1.3209
n_g	1.9764	1.7306	1.7083
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	3.15737	37.3119	32.1363
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	18.9442	223.8716	192.8182
R^2	0.9952	0.9469	0.9571
R^2_{adj}	0.9936	0.9293	0.9428
Redlich-Peterson isotherm			
k_{rp}	0.4766	0.4983	0.5199
α_r	7.8029	2.2229	6.7650
b	2.5672	2.3719	2.1659
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	2.0097	0.8193	1.0855
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	12.0587	4.9161	6.5129
R^2	0.9969	0.9988	0.9985
R^2_{adj}	0.9959	0.9984	0.9980
Toth isotherm			
q_m	60.0000	61.0953	64.8897
K_{th}	0.0084	0.0078	0.0076
n_{th}	3.0000	4.7284	3.8873
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	4.5241	0.9767	0.5482
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	27.1447	2.2604	3.2892
R^2	0.9931	0.9994	0.9992
R^2_{adj}	0.9908	0.9992	0.9990
Temkin isotherm			
b_t	22.1073	22.9197	23.6607
k_t	0.0658	0.0664	0.0667
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	13.0693	9.7965	8.9159
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	91.4856	68.5899	62.4113
R^2	0.9768	0.9814	0.9841
R^2_{adj}	0.9735	0.9814	0.9841

ตารางที่ 14 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกหมู

แบบจำลองไอโซเทอม	ถ่านไบโอชาร์หมู 300 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 400 °C	ถ่านไบโอชาร์หมู 500 °C
Freundlich isotherm			
k_f	3.0825	2.8856	3.1027
n_f	1.8591	1.7974	1.8227
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	33.1115	29.5189	27.9063
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	298.0041	265.6706	251.1572
R^2	0.9320	0.9434	0.9488
R^2_{adj}	0.9245	0.9371	0.9431
Langmuir isotherm			
q_m	86.0433	91.8778	93.8280
k_l	0.0083	0.0076	0.0078
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	15.3636	12.9824	11.4727
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	138.2724	116.8423	103.2550
R^2	0.9684	0.9751	0.9789
R^2_{adj}	0.9649	0.9723	0.9766
Liu isotherm			
q_m	1.5105	1.4154	1.5248
k_g	1.4626	1.3757	1.4553
n_g	1.8586	1.7972	1.8226
Reduced Chi-Sqr. ($g\ mg^{-1}$)	37.2505	33.2088	31.3946
Res. sum of squ. ($g\ mg^{-1}$) ²	298.0042	265.6707	251.1572
R^2	0.9320	0.9436	0.9488
R^2_{adj}	0.9151	0.9293	0.9360
Redlich-Peterson isotherm			
k_{rp}	0.4769	0.4792	0.5047
α_r	3.9331	4.9799	9.6168
b	2.2868	2.2304	2.1170

<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	3.5346	3.0223	2.4096
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	28.2773	24.1785	19.2769
<i>R²</i>	0.9935	0.9948	0.9960
<i>R²_{adj}</i>	0.9919	0.9935	0.9950
Toth isotherm			
<i>q_m</i>	54.7321	57.0768	59.4012
<i>K_{th}</i>	0.0081	0.0078	0.0079
<i>n_{th}</i>	6.1147	5.6402	4.7128
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	1.3842	1.0349	0.8292
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	11.0741	8.2795	6.6339
<i>R²</i>	0.9974	0.9982	0.9986
<i>R²_{adj}</i>	0.9968	0.9978	0.9983
Temkin isotherm			
<i>b_t</i>	20.6092	21.5299	21.8666
<i>k_t</i>	0.0682	0.0659	0.0684
<i>Reduced Chi-Sqr. (g mg⁻¹)</i>	11.4586	9.0536	8.8350
<i>Res. sum of squ. (g mg⁻¹)²</i>	103.1276	81.4802	79.5153
<i>R²</i>	0.9764	0.9826	0.9838
<i>R²_{adj}</i>	0.9738	0.9807	0.9820

ตารางที่ 15 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกการดูดซับของถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จาก กระดุกวัวและหมู

วัสดุดูดซับ	อุณหภูมิ (K)	K_f (L mg ⁻¹)	K_e	ΔG^0 (kJ mol ⁻¹)	ΔH^0 (kJ mol ⁻¹)	ΔS^0 (kJ K ⁻¹ mol ⁻¹)
ถ่านไบโอชาร์วัว 300 °C	298	0.00743	1,795	-18.85	77.78	0.32
	308	0.0297	7,175	-22.10		
	318	0.0531	12,828	-25.34		
ถ่านไบโอชาร์วัว 400 °C	298	0.00719	1,737	-18.50	86.69	0.35
	308	0.0231	5,580	-22.03		

	318	0.0649	15,679	-25.56		
ถ่านไบโอชาร์ร้าว 500 °C	298	0.00688	1,662	-18.52	103.53	0.41
	308	0.0321	7,755	-22.61		
	318	0.0949	22,927	-26.71		
ถ่านไบโอชาร์หยาบ 300 °C	298	0.00835	2,017	-18.68	56.15	0.25
	308	0.0141	3,406	-21.19		
	318	0.0349	8,431	-23.70		
ถ่านไบโอชาร์หยาบ 400 °C	298	0.00765	1,848	-18.83	76.53	0.32
	308	0.0267	6,450	-22.03		
	318	0.0531	12,828	-25.23		
ถ่านไบโอชาร์หยาบ 500 °C	298	0.00785	1,896	-18.81	97.78	0.39
	308	0.03293	7,955	-22.73		
	318	0.09362	22,618	-26.64		



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวพรมงคล ต้นสมรส
วันเกิด วันที่ 16 เดือนสิงหาคม พ.ศ.2542
สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 198 หมู่ที่ 1 บ้านพิมาน ตำบลพิมาน อำเภอนาแก จังหวัดนครพนม รหัสไปรษณีย์ 48130
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2557 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนนาแกพิทยาคม จังหวัดนครพนม
พ.ศ. 2560 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนาแกพิทยาคม จังหวัดนครพนม
พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภัโต ชีเว