



การจัดทำทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดูกไก่และเปิดที่เตรียมด้วยกระบวนการ
แยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

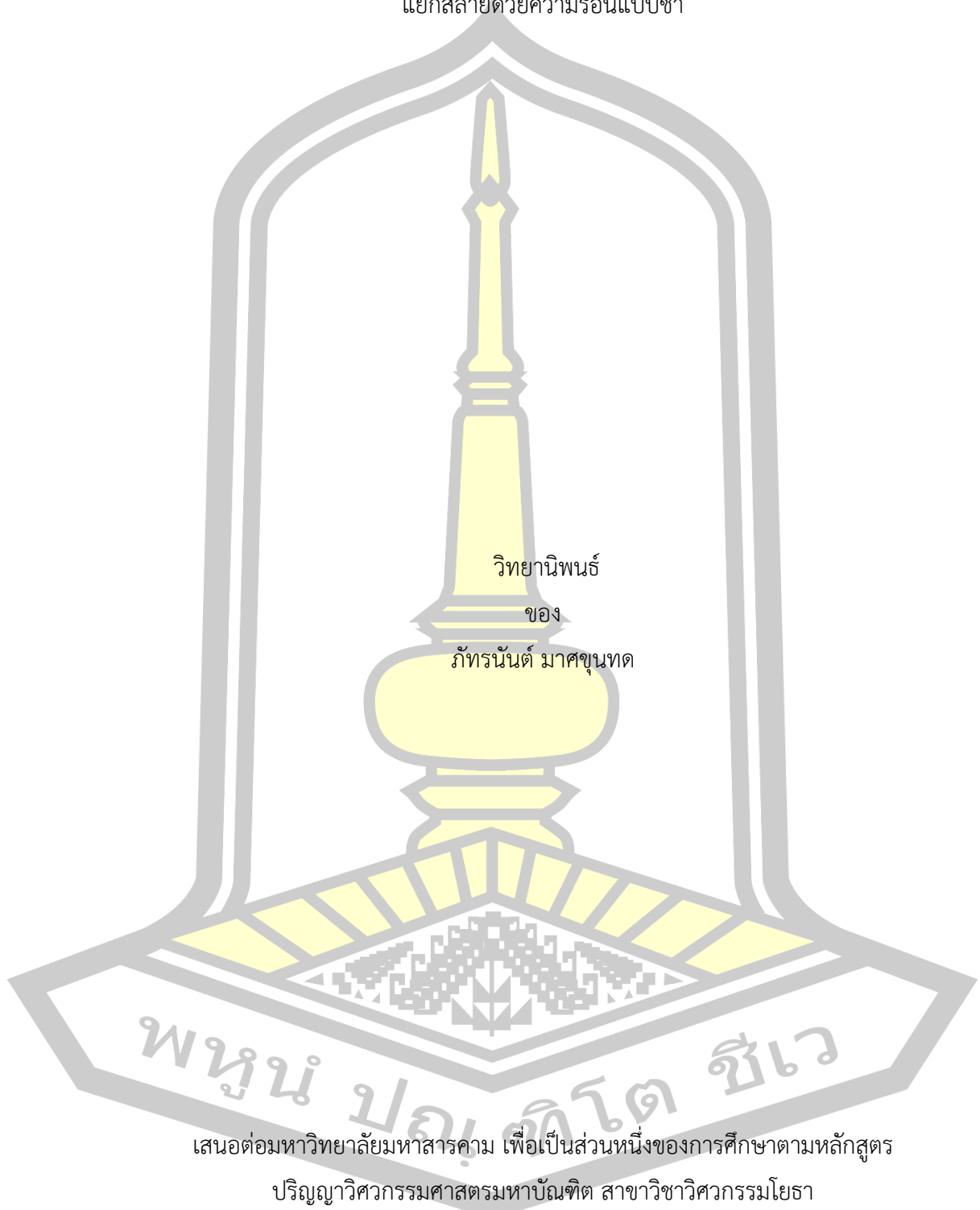
วิทยานิพนธ์
ของ
ภัทรนันต์ มาศขุนทด

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การจัดทอองแองในสารละลายกรดด้วยถ่านซาร์จากกระดูกไก่และเป็ดที่เตรียมด้วยกระบวนการ
แยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

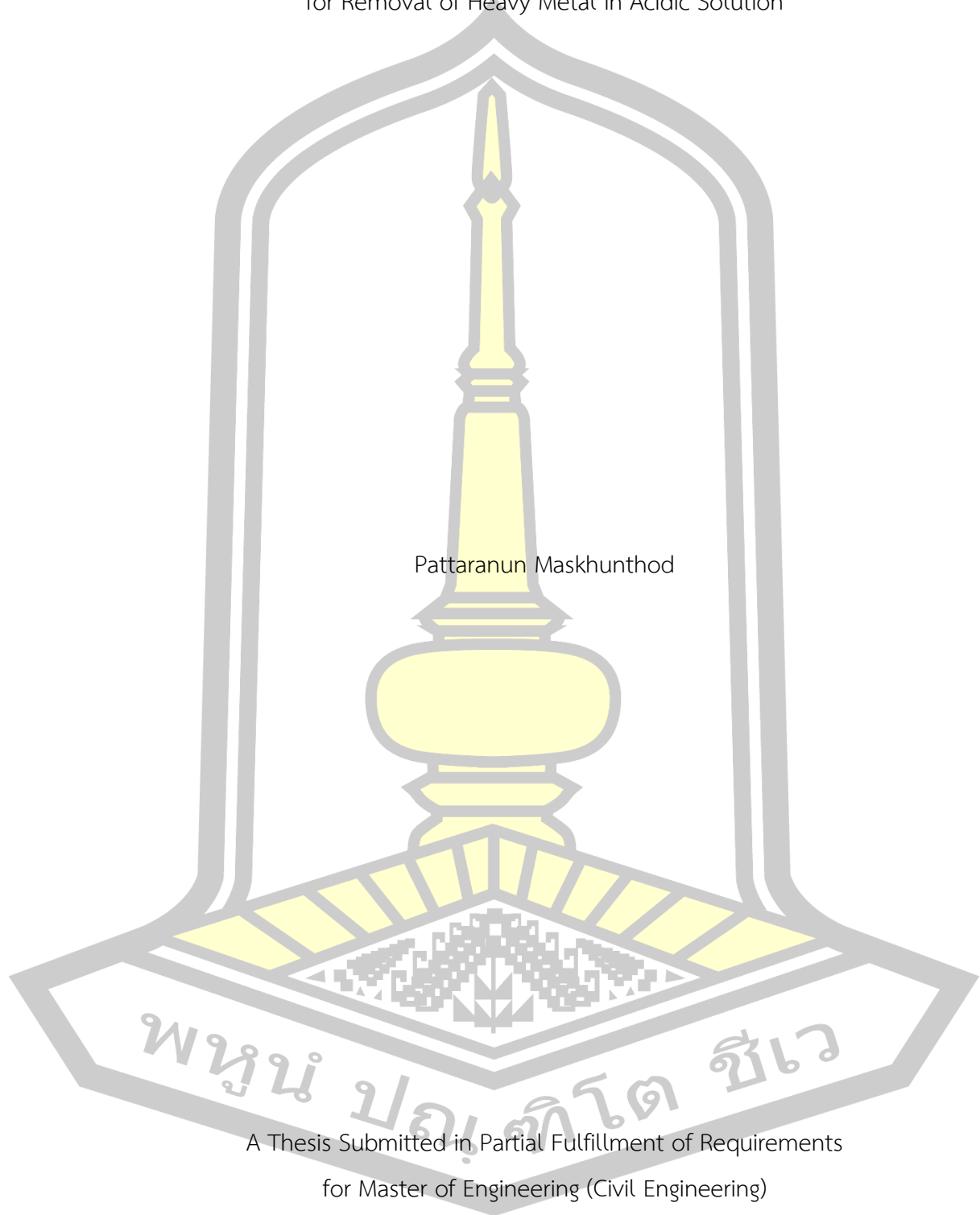
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Slow Pyrolysis of Waste Chicken and Duck Bone for Production of Biochar and its Use
for Removal of Heavy Metal in Acidic Solution

Pattaranun Maskhunthod



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

June 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวภัทรนันต์ มาศขุน
ทด แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. สุรัชย์ วงขารี่)

.....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	การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดูกไก่และเป็ดที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า		
ผู้วิจัย	ภัทรนันต์ มาศขุนทด		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัชย์ วงชารี		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านไบโอชาร์จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ดเหลือทิ้งจากร้านอาหารในเขตพื้นที่จังหวัดมหาสารคามด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ในสารละลายกรด และลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชาร์ที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่าลักษณะถ่านกระดูกหลังกระบวนการเผามีสีดำมันวาว มีความปริมาณธาตุคาร์บอนสูง ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 500 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 84.18 ตารางเมตรต่อกรัม มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 6-12 นาโนเมตร เป็นรูพรุนขนาดกลาง ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบ Type III และมีหมู่กลุ่มไฮดรอกซิล กลุ่มแอมีน และไฮดรอกซี สามารถดูดซับโลหะหนักจำพวกทองแดงได้ดี จากการศึกษาการดูดซับทองแดงในสารละลายกรดพบว่าสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมคือถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 องศาเซลเซียส เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ 60 นาทีที่มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบโจวานโนวิก และจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order นอกจากนี้อุณหภูมิผลศาสตร์ของการดูดซับแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนหรือการดูดซับทางกายภาพ สรุปได้ว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนทองแดงได้

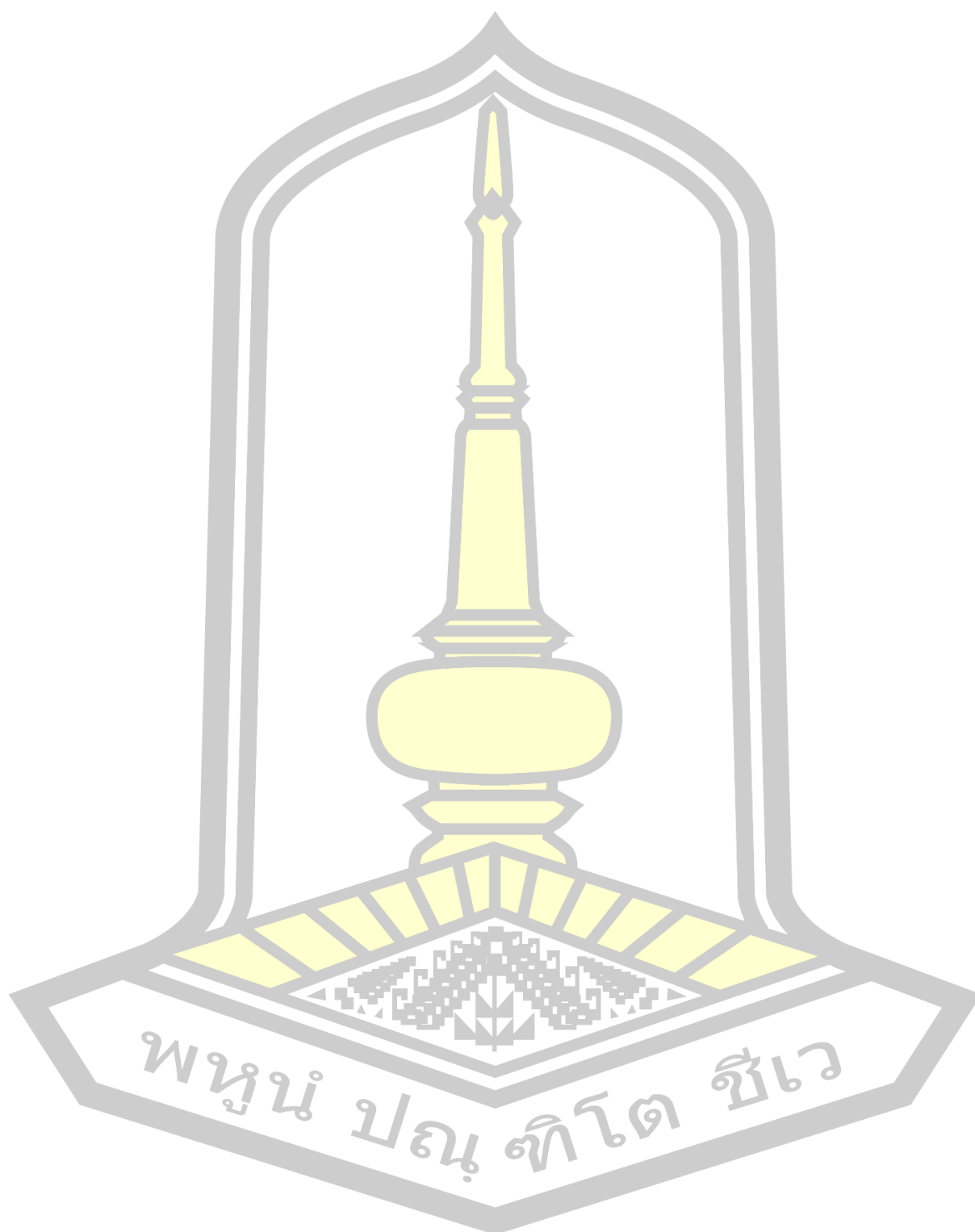
คำสำคัญ : กระดูกไก่, กระดูกเป็ด, ถ่านชาร์, ทองแดง

TITLE	Slow Pyrolysis of Waste Chicken and Duck Bone for Production of Biochar and its Use for Removal of Heavy Metal in Acidic Solution		
AUTHOR	Pattaranun Maskhunthod		
ADVISORS	Assistant Professor Surachai Wongcharee , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Mahasarakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

This research investigates the preparation of biochar from chicken and duck bones discarded by restaurants in Maha Sarakham province through slow pyrolysis at temperatures of 300, 400, and 500 degrees Celsius. The objective is to evaluate their efficacy in adsorbing copper from acidic solutions and to characterize the physical and chemical properties of the resulting biochar. The study found that the post-pyrolysis bone char exhibits a glossy black appearance with a high carbon content. Specifically, duck bone char produced at 500 degrees Celsius showed the highest specific surface area of 84.18 square meters per gram, with pore diameters ranging from 6 to 12 nanometers, classifying it as mesoporous. The adsorption isotherms were identified as Type III, and the presence of hydroxyl, amine, and hydroxy groups was confirmed, indicating good potential for heavy metal adsorption, particularly copper. The optimal condition for copper adsorption from acidic solutions was achieved using chicken bone char at 500 degrees Celsius, reaching adsorption equilibrium at 60 minutes. The adsorption behavior aligned with the Jovanovic isotherm and followed pseudo-first-order kinetics. Furthermore, thermodynamic analysis revealed that the adsorption process was exothermic, suggesting physical adsorption. In conclusion, the prepared biochar demonstrates significant potential for application in the adsorption of copper-contaminated wastewater.

Keyword : Chicken bones, Duck bones, Biochar, Copper



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดุกไก่และเปิดที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจาก ได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัช วงษาริ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ พร้อมทั้งให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ และเป็นผู้เชี่ยวชาญ ตรวจสอบแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ทำการเรียนการสอนในคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยมหาสารคาม ที่กรุณาให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีเสียสละเวลาท้ายคาบการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ได้ให้กำลังใจและส่งเสริมสนับสนุนกำลังทรัพย์ในการศึกษาเล่าเรียนครั้งนี้จนสำเร็จการศึกษา

ภัทรนันต์ มาศขุนทด

พูน ปณ จิตโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6 สถานที่ทำการทดลอง.....	4
1.7 แผนการดำเนินงาน.....	4
1.8 งบประมาณการดำเนินการ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลทางเศรษฐกิจของไก่.....	6
2.2 ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลทางเศรษฐกิจของเป็ด.....	8
2.3 ขยะอาหาร.....	11
2.4 ถ่านกระดุก.....	11
2.5 ถ่านชาร์ หรือ ถ่านไบโอชาร์.....	12

2.6 กระบวนการไพโรไลซิส	14
2.7 ทฤษฎีการดูดซับ	16
2.8 ชนิดของไอโซเทอม	17
2.9 จลพลศาสตร์การดูดซับ	21
2.10 แบบจำลอง Elovich.....	23
2.11 Fractal-like pseudo first order model (FLPFO).....	23
2.12 Fractal-like pseudo second order (FLPSO)	24
2.13 แบบจำลองจลนพลศาสตร์.....	24
2.14 ทองแดง	26
2.15 การปนเปื้อนของทองแดงในสิ่งแวดล้อม.....	26
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 สถานที่ทำการวิจัย	30
3.2 แผนผังวิธีการดำเนินการ.....	30
3.3 การเตรียมถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)	31
3.4 วิธีการทดลอง.....	33
3.5 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar).....	34
3.6 ความสามารถในการดูดซับ.....	37
3.7 วิธีการทดลอง.....	38
3.8 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	40
3.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	41
3.10 เทอร์โมไดนามิก(Thermodynamic)	41
บทที่ 4 ผลการศึกษา	43

4.1 ลักษณะทางกายภาพของกระดุกไม้และเปิดก่อนและหลังกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า.....	43
4.2 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกระดุกไม้และกระดุกเปิด.....	44
4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	63
บทที่ 5.....	97
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	97
5.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านชาร์จากกระดุกไม้และถ่านชาร์จากกระดุกเปิด ..	97
5.2 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายด้วยถ่านชาร์จากกระดุกไม้และถ่านชาร์จากกระดุกเปิด ...	98
5.3 ข้อเสนอแนะ	99
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	105
ภาคผนวก ข ภาพประกอบการทดลอง	110
ภาคผนวก ค ผลงานการประชุมวิชาการ.....	117
ประวัติผู้เขียน	119



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินการ.....	4
ตาราง 2 การผลิต การบริโภค และส่งออกเนื้อไก่ของไทย	8
ตาราง 3 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	13
ตาราง 4 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ.....	14
ตาราง 5 แผนการทดลอง	33
ตาราง 6 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในกระดูกไก่.....	47
ตาราง 7 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในกระดูกเปิด	47
ตาราง 8 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในถ่านกระดูกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C.....	47
ตาราง 9 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในถ่านกระดูกเปิดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	48
ตาราง 10 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านชาร์จากกระดูกไก่และกระดูกเปิด	62
ตาราง 11 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วย CHNS	63
ตาราง 12 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่.....	79
ตาราง 13 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกเปิด	84
ตาราง 14 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่.....	88
ตาราง 15 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกเปิด.....	92
ตาราง 16 อุณหพลศาสตร์ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C	95
ตาราง 17 อุณหพลศาสตร์ถ่านชาร์จากกระดูกเปิดอุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C.....	96

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ความต้องการบริโภคเนื้อเป็ดแยกตามประเทศแถบ AEC (พันทัน)	11
ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านไบโอชาร์.....	13
ภาพประกอบ 3 ภาพถ่ายจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของตัวอย่างถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 450 × (CR, CS), 170 × (OP), 330 × (PO), 1000 × (SB) และ 200 × (WH) (CR = ผงถ่าน CS = กะลามะพร้าว; OP = เปลือกส้ม; PO = ทะลายปาล์มน้ำมัน; SB = กากชานอ้อย WH = ผักตบชวา)	14
ภาพประกอบ 4 ขั้นตอนการผลิตถ่านไบโอชาร์.....	15
ภาพประกอบ 5 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	27
ภาพประกอบ 6 แผนผังวิธีการดำเนินการ.....	30
ภาพประกอบ 7 เตาเผาไร้อากาศ	31
ภาพประกอบ 8 กระตุกตกแห้งสำหรับการเผา	32
ภาพประกอบ 9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX).....	34
ภาพประกอบ 10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD).....	35
ภาพประกอบ 11 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	36
ภาพประกอบ 12 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET)	37
ภาพประกอบ 13 ลักษณะทางกายภาพของกระดุกไก่และกระดุกเป็ด.....	43
ภาพประกอบ 14 SEM – EDX (ก) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่ก่อนการเผาที่กำลังขยาย 25x 250x 500x และ (ข) ภาพการส่องขยายกระดุกเป็ดก่อนเผาที่กำลังขยาย 25x 250x 500x	44
ภาพประกอบ 15 SEM – EDX (ก) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C กำลังขยาย 25x 250x 500x (ข) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C	

กำลังขยาย 25x 250x 500x และ (ค) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C	
กำลังขยาย 25x 250x 500x	46
ภาพประกอบ 16 SEM EDX (ก) ภาพการส่องขยายกระดุกเปิดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C	
กำลังขยาย 25x 250x 500x (ข) ภาพการส่องขยายกระดุกเปิดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C	
กำลังขยาย 25x 250x 500x และ (ค) ภาพการส่องขยายกระดุกเปิดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C	
กำลังขยาย 25x 250x 500x	46
ภาพประกอบ 17 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD ของถ่านกระดุกไก่ที่อุณหภูมิ 300 °C	
400 °C 500 °C	49
ภาพประกอบ 18 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD ของถ่านกระดุกเปิดที่อุณหภูมิ 300 °C	
400 °C 500 °C	50
ภาพประกอบ 19 FTIR สเปกตรัมของกระดุกไก่อ่อนการเผา	51
ภาพประกอบ 20 FTIR สเปกตรัมของกระดุกเปิดก่อนการเผา	52
ภาพประกอบ 21 FTIR สเปกตรัมของถ่านชาร์จากกระดุกไก่ (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อุณหภูมิ 300 °C	
(ข) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อุณหภูมิ 400 °C (ค) ถ่านชาร์	54
ภาพประกอบ 22 FTIR สเปกตรัมของถ่านชาร์จากกระดุกเปิด (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด	56
ภาพประกอบ 23 ไอโซเทอร์มของการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อุณหภูมิ 300 °C	
(ข) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อุณหภูมิ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อุณหภูมิ 500 °C	59
ภาพประกอบ 24 ไอโซเทอร์มของการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิดอุณหภูมิ 300 °C	
(ข) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิดอุณหภูมิ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิดอุณหภูมิ 500 °C	61
ภาพประกอบ 25 แสดง pH _{PZC} (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่ 400 °C	
(ค) ถ่านชาร์จากกระดุกไก่ 500 °C และ (ง) เปรียบเทียบผล pH _{PZC} ของแต่ละอุณหภูมิ	66
ภาพประกอบ 26 แสดง pH _{PZC} (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด	
400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 500 °C และ (ง) เปรียบเทียบผล pH _{PZC} ของแต่ละอุณหภูมิ	68
ภาพประกอบ 27 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ	71
ภาพประกอบ 28 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ	73
ภาพประกอบ 29 ผลการศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาที่มีผลต่อการในการดูดซับ	75

ภาพประกอบ 30 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ	76
ภาพประกอบ 31 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกไม้ 300 °C	79
ภาพประกอบ 32 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกไม้ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จาก กระดุกไม้ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกไม้ 500 °C	83
ภาพประกอบ 33 ไอโซเทอมของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกไม้ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จาก กระดุกไม้ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกไม้ 500 °C	88
ภาพประกอบ 34 ไอโซเทอมของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 300 °C (ข) ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 500 °C	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้เทคนิคการกำจัดโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิเกิล สารหนู โปรท โครมเมียม ออกจากน้ำที่ปนเปื้อนโลหะเหล่านี้โดยการใช้เทคนิค เช่น การตกตะกอน การแข็งตัว การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวิร์สออสโมซิส การกรองนาโนฟิลเตรชัน อิเล็กโทรลิซิส และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเข้าถึงเทคนิคเหล่านี้ส่วนใหญ่มีข้อจำกัดเนื่องจากต้นทุนการดำเนินการสูงและการก่อตัวของกากตะกอน ในบรรดาเทคนิคที่กล่าวถึงข้างต้น การดูดซับเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดโลหะหนักเนื่องจากประหยัดต้นทุนและง่ายต่อการดำเนินการเมื่อพิจารณาตัวดูดซับสำหรับโลหะหนัก เช่น ถ่านกัมมันต์ วัสดุเซลลูโลส ซีโอไลต์ อะลูมิเนียม วัสดุนาโน ถ่านชีวภาพ และถ่านกระดูก ซึ่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการเตรียม และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

ถ่านชาร์ ถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ (Biochar) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวลหรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ กระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนนี้เรียกว่า ไพโรไลซิส (pyrolysis) ไพโรไลซิส เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยจำกัดอากาศหรือปราศจากอากาศ ที่มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธีคือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (slow pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้าๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมงและใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียส ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (fast pyrolysis) ที่ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาทีใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500-1,000 องศาเซลเซียส (พินิจภณ, 2557) คุณสมบัติและองค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะแตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป ได้แก่ ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่นๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนขณะให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยไม่มีออกซิเจนและไฮโดรเจน มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์ของถ่านชีวภาพมีหลายด้าน เช่น การลดการดูดซับสารเคมีที่ใช้กำจัดวัชพืชและศัตรูพืช และลดการดูดซับโลหะหนักที่อยู่ในดินและน้ำ ของพืชที่ปลูก โดยถ่านชีวภาพจะตรึงสารเคมีและโลหะหนักกลุ่มนี้ไว้ ทำให้ลดผลกระทบต่อน้ำที่ปลูกจากสารเคมีและโลหะหนักที่ปนเปื้อน โดยเฉพาะพืชผักสวนครัวและพืช

สมุนไพร การบำบัดน้ำเสียหรือแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักและสารเคมี ใช้ดูดซับน้ำมัน ปิโตรเลียม การดูดซับแร่ธาตุที่ปนเปื้อนไปในแหล่งน้ำ

ในปัจจุบันการนำไก่อและเปิดมาประกอบอาหารเป็นที่นิยมมากในกลุ่มผู้บริโภคจึง มีการคาดการณ์ว่าปริมาณการผลิตไก่แช่เย็น แช่แข็ง และแปรรูปในปี 2564-2566 มีแนวโน้มเติบโตเฉลี่ย 3-5% ต่อปี ตามกำลังซื้อที่ฟื้นตัวอย่างค่อยเป็นค่อยไป ปัจจัยหนุนจากความต้องการบริโภคเนื้อไก่ในประเทศที่เพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งเป็นผลจากเนื้อไก่มีไขมันต่ำและราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์ประเภทอื่น (ชัยวัฒน์ สาวเจริญสุข, 2564) เช่นเดียวกันกับเปิดสดแช่เย็นแช่แข็งที่มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 543.12 ล้านบาท (สถิติการส่งออกสินค้าเกษตร, 2564) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปริมาณของเสียจากการแปรรูปไก่และเปิดมี ปริมาณเพิ่มมากขึ้น กระดูกไก่และเปิดที่เหลือจากการแปรรูปหรือหลังจากการบริโภคแล้วพบว่า มีการนำไปแปรรูปเป็นอาหารปลาในกระชัง วิธีที่นิยมคือนำกระดูกไก่และเปิดมาตากแดด ซึ่งวิธีทำ อาจะยังควบคุมตัวแปรต้น เช่น อุณหภูมิไม่ได้ ทำให้กระดูกมีความแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ ความชื้น ปริมาณโปรตีน ไม่เป็นไปตามมาตรฐานอาหารสัตว์

ประเทศไทยมีน้ำเสียประมาณ 9.5 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยประเมินจากองค์กรปกครอง ส่วนท้องถิ่น (อปท.) ทั่วประเทศ 7,353 แห่ง พบว่า จัดการน้ำเสียได้เพียงวันละ 3 ล้านลูกบาศก์เมตร เท่านั้น ส่วนอีก 6 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ไม่มีระบบกำจัดน้ำเสียรองรับ (สถานีวิทย์กระจายเสียง แห่งประเทศไทย, 2561) จึงทำให้ปัญหาน้ำเสียยังรบกวนแก้ไขให้เป็นรูปธรรม ในน้ำเสียประกอบไปด้วยโลหะหนัก เช่น ทองแดง ที่เกิดจากการปล่อยของเสียที่มีโลหะหนักปนอยู่ลงสู่แม่น้ำธรรมชาติ โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตก ตะกอน สะสมอยู่ในดินการสะสมโลหะหนักดังกล่าวจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับชั้นของห่วงโซ่อาหาร (bioaccumulation in tropic level) และหากมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำนั้นๆ ตลอดจนถึงผู้บริโภคน้ำนั้นไปเป็นอาหารด้วย (Neeratanaphan, 2011)

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจที่จะนำกระดูกไก่และกระดูกเปิดที่เป็น ของเสียจากกระบวนการแปรรูปมาสร้างมูลค่าและสร้างประโยชน์ให้กับเศษกระดูก ซึ่งจะเกิดเป็นถ่าน ชาร์จจากเศษกระดูกไก่และกระดูกเปิดโดยถ่านชาร์จจากเศษกระดูกนี้จะนำไปต่อยอดในการบำบัดน้ำ เสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักทองแดง เพื่อที่จะบำบัดน้ำเสียให้หมุนเวียนกลับมาใช้ได้อีกครั้ง ลด การเกิดขยะจากการแปรรูปไก่และเปิด รวมถึงการสร้างมูลค่าให้กับถ่านชาร์จและเศษกระดูกให้สูงขึ้น ได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนความสามารถในการทองแดงในสารละลายกรด ด้วย ถ่านชาร์จที่เตรียมได้จากกระดูกเปิดและไก่และประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง โดยทำการศึกษา ลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์จที่เตรียมได้จากกระดูกเปิดและไก่ อีกทั้งศึกษา ค่า pH ความเข้มข้น เริ่มต้น อัตราปริมาณถ่านชาร์จที่เตรียมได้ และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงในสารละลายกรด

ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญในกระบวนการดูดซับ ดังนั้นความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบในกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่เหมาะสม รวมไปถึงต้นทุนการผลิตถ่านชาร์จากระดุกเปิดและไก่ที่มีผลต่อการออกแบบที่ประสบความสำเร็จในอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เตรียมถ่านชาร์โดยใช้การกระดุกไก่และเปิดด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

1.2.2 ศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกไก่และเปิด และทำการเปรียบเทียบถ่านชาร์ที่เตรียมได้กับกระดุกไก่และเปิดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

1.2.3 ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากสารละลายในกรด

1.2.4 ศึกษาทองแดงสังเคราะห์ในสารละลายกรดด้วย ไอโซเทอม จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และเทอโมไดนามิกของการดูดซับ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกเปิดและไก่ ที่ผ่านกระบวนการกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า ที่อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างคล้ายถ่านกัมมันต์

1.3.2 ถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดุกไก่และเปิด สามารถนำมาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงในสารละลายกรดได้ เช่นทองแดงจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 เศษกระดุกไก่และเศษกระดุกเปิดที่ทำการศึกษาได้มาจากร้านอาหารที่ผ่านการต้มใน การทำอาหาร

1.4.2 อุณหภูมิ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.4.3 ศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างภายใน โดยใช้เครื่องมือขั้นสูงคือ SEM- EDX, XRD, BET, และ FTIR ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายสังเคราะห์ทองแดงที่เตรียมได้จากสารละลายกรด

1.4.4 น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงทำการเตรียมในสารละลายกรดที่มีค่า pH ไม่เกิน 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถนำถ่านชาร์จากเศษกระดุกมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของทองแดงได้

1.5.2 สามารถนำเศษกระดุกไก่และเศษกระดุกเป็ดมาแปรรูปเป็นถ่านชาร์ซึ่งมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น

1.5.2 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกระดุกไก่และเป็ดได้

1.5.3 สามารถนำถ่านชาร์กระดุกที่เตรียมได้ได้จากไก่และเป็ดมาบำบัดน้ำเสียที่มีทองแดงปนเปื้อนได้ โดยเฉพาะโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ สังเคราะห์ทองแดงในสารละลายที่ค่า pH ไม่เกิน 2 ได้

1.6 สถานที่ทำการทดลอง

1.6.1 สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.6.2 ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

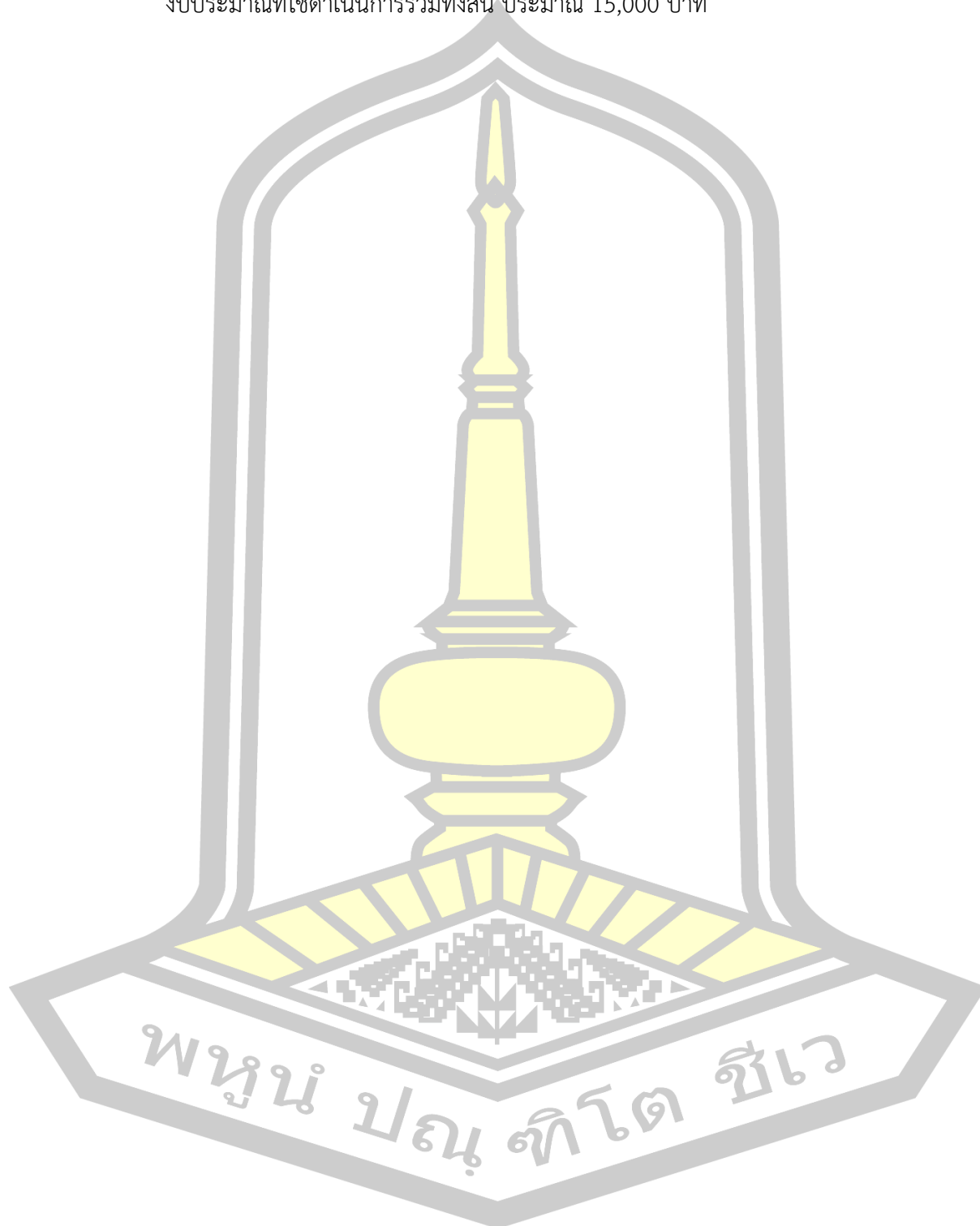
1.7 แผนการดำเนินงาน

ตาราง 1แผนการดำเนินการ

รายการ	ระยะเวลา							
	ภาคเรียนที่ 2/2565				ภาคเรียนที่ 1/2566			
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
การศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←			→				
จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี					↔			
เริ่มเผากระดุก					←			→
นำตัวอย่างถ่านกระดุกไปตรวจสอบโครงสร้างและหาประสิทธิภาพการดูดซับ					←			→
จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์								↔

1.8 งบประมาณการดำเนินการ

งบประมาณที่ใช้ดำเนินการรวมทั้งสิ้น ประมาณ 15,000 บาท



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลทางเศรษฐกิจของไก่

ไก่เนื้อจัดอยู่ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์ที่เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ยิ่งในช่วงที่กระแสการรักสุขภาพเพิ่มสูงขึ้น อัตราการเลือกบริโภคโปรตีนจากไก่ก็ยิ่งเพิ่มสูงตามไปด้วย เพราะเนื้อไก่เป็นโปรตีนคุณภาพสูงที่มีไขมันน้อย ราคาอ่อนโยน และปรุงรสได้หลากหลายสไตล์ ไก่จึงกลายเป็นเนื้อสัตว์ที่ตลาดรองรับจากทั่วทุกมุมโลก เมื่อมองในภาพกว้างจะพบว่า การบริโภคเนื้อไก่มีแนวโน้มเพิ่มทุกปี โดยมีโซนยุโรปกับประเทศจีนเป็นกลุ่มผู้บริโภคขนาดใหญ่ มีการส่งออกและนำเข้าตลอดเวลา พอย้อนกลับมาดูวงการไก่เนื้อในประเทศไทยก็พบว่า เราเป็นผู้ส่งออกผลผลิตจากไก่เนื้อที่ใหญ่ที่สุดในภูมิภาคเอเชีย และอยู่ในอันดับ 4 ของโลก รศ.ดร.สุภาพร อิศริโยดม และคณะ กล่าวว่า สินค้าส่งออกของเรามีทั้งแบบเนื้อไก่สดใหม่และเนื้อไก่ที่ผ่านการแปรรูปแล้ว ทั้งหมดนี้สามารถทำกำไรให้ประเทศได้อย่างมหาศาล ตัวอย่างเช่นการส่งออกเนื้อไก่แปรรูปเพียงอย่างเดียวก็สร้างมูลค่าส่งออกได้สูงถึง 33,172 ล้านบาท ซึ่งตัวเลขจะไม่หยุดอยู่แค่นี้แต่จะเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่าในอนาคต ปัญหาอย่างเดียวของเราคือยังไม่มีการใช้เทคโนโลยีในการเพาะเลี้ยงไก่เนื้อมากนัก หากเกษตรกรทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงไก่เนื้อและปศุสัตว์ไก่เนื้อให้ดี และรู้จักเลือกใช้เครื่องมืออันทันสมัยที่เหมาะสมกับตัวเอง ก็จะช่วยผลักดันศักยภาพการผลิตของเราก้าวขึ้นสู่ชั้นนำของโลกอีกระดับหนึ่งได้

เดิมทีการเลี้ยงไก่จะเป็นแบบปล่อยอิสระภายในบริเวณบ้าน และไม่มีการแยกประเภทของไก่เนื้อหรือไก่ไข่อย่างชัดเจน ผลผลิตที่ได้จากการเลี้ยงไก่ในยุคแรกๆ จึงไม่ได้มีความโดดเด่นทางใดทางหนึ่งเป็นพิเศษ หากเทียบกับปัจจุบันก็อาจเรียกได้ว่ามันคือไก่ทวีประสงคนั่นเอง ไก่พื้นเมืองคือสายพันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในขณะนั้น ส่วนหนึ่งต่อยอดมาไก่ป่าและอีกส่วนหนึ่งได้มาจากการติดต่อค้าขายกับชาวต่างชาติ เมื่อแต่ละพื้นที่มีปริมาณการเพาะเลี้ยงไก่กันมากขึ้นจึงมีคนริเริ่มสร้างระบบฟาร์มขึ้นมา แต่ก็ยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จเท่าไรนักเนื่องจากยังขาดยาและวัคซีนป้องกันโรคต่างๆ จุดเปลี่ยนสำคัญเกิดขึ้นในยุคของ จอมพล ป. พิบูลสงคราม ปศุสัตว์แห่งชาติและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเริ่มผลักดันให้การเลี้ยงไก่สามารถทำเป็นอาชีพได้ ด้วยการจัดหาสายพันธุ์ไก่คุณภาพดีจากต่างประเทศ การให้ความรู้เกี่ยวกับระบบฟาร์ม การให้ทุนเพาะเลี้ยงไก่แก่เกษตรกร ตลอดจนจัดการแข่งขันเพื่อกระตุ้นวงการเลี้ยงไก่ให้มีความตื่นตัวยิ่งขึ้น อีกหนึ่งหน่วยงานที่มีบทบาทอย่างมากก็คือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นอกจากจะทำการศึกษาและวิจัยทุกองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยงไก่ จนกลายเป็นแหล่งข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อเกษตรกรอย่างมากแล้ว ก็ยังมีส่วนช่วยให้ระบบฟาร์ม

เพาะเลี้ยงมีมาตรฐานและสามารถต่อยอดผลผลิตทั้งหมดให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นได้ด้วย (พา
ขวัญ, 2562)

2.2.1 สายพันธุ์ของไก่เนื้อ

ไก่พื้นเมือง ข้อดีของไก่พื้นเมืองคือปรับตัวตามสภาพแวดล้อมได้ง่าย สามารถเลี้ยง
ปล่อยตามธรรมชาติได้และส่วนมากมีสุขภาพที่สมบูรณ์แข็งแรง การผสมพันธุ์ระหว่างไก่พื้นเมืองที่มี
สายพันธุ์แตกต่างกัน จะทำให้ได้ลูกผสมที่ตรงกับความต้องการของตลาดและขายได้ราคาดีกว่า

ไก่พื้นเมือง ข้อดีของไก่พื้นเมืองคือปรับตัวตามสภาพแวดล้อมได้ง่าย สามารถเลี้ยง
ปล่อยตามธรรมชาติได้และส่วนมากมีสุขภาพที่สมบูรณ์แข็งแรง การผสมพันธุ์ระหว่างไก่พื้นเมืองที่มี
สายพันธุ์แตกต่างกัน จะทำให้ได้ลูกผสมที่ตรงกับความต้องการของตลาดและขายได้ราคาดีกว่า

ไก่พันธุ์ลูกผสม จะเป็นกลุ่มไก่เนื้อที่มีความหลากหลายทางสายพันธุ์มากที่สุด ไก่เนื้อ
ที่ได้จะมีลักษณะเด่นของพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ผสมกัน ทำให้เลี้ยงง่าย โตเร็ว และได้ผลผลิตเป็นเนื้อไก่
คุณภาพดีที่มีปริมาณมาก ตัวอย่างของไก่พันธุ์ลูกผสมในประเทศไทย คือ สายพันธุ์อาร์เบอร์เอเคอร์
สายพันธุ์รอส สายพันธุ์คอปป์ เป็นต้น

2.2.2 ด้านการผลิต

ปี 2561 – 2565 การผลิตไก่เนื้อของไทยเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 3.59 ต่อปี โดยในปี
2565 มีการผลิตไก่เนื้อ 1,771.99 ล้านตัว หรือคิดเป็นเนื้อไก่ 2.83 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 1,754.04
ล้านตัว หรือคิดเป็นเนื้อไก่ 2.80 ล้านตัน ของปี 2564 ร้อยละ 1.02 เนื่องจากความต้องการบริโภคทั้ง
ในและต่างประเทศเพิ่มขึ้น จากการผ่อนคลายมาตรการป้องกันการแพร่ระบาดของโรคโควิด 19
(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566)

2.2.3 ด้านการตลาดบริโภค

ปี 2561 – 2565 การบริโภคไก่ของไทยเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 6.94 ต่อปี โดยปี
2565 มีปริมาณการบริโภคเนื้อไก่ 1.88 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 1.86 ล้านตัน ของปี 2564 ร้อยละ 0.94
เนื่องจากเนื้อสุกมีราคาแพง ผู้บริโภคจึงหันมาบริโภคเนื้อไก่มากขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร,
2566)

พูน ปณ จิต ชเว

ตาราง 2 การผลิต การบริโภค และส่งออกเนื้อไก่ของไทย

ปี	ผลิต ไก่เนื้อ	ผลิต เนื้อไก่	บริโภค (ตัน)	ส่งออก (ตัน)		
	(ล้านตัว)	(ตัน)		ไก่สด	ไก่แปรรูป	รวม
2561	1,503.35	2,297,102	1,457,620	279,050	560,432	839,482
2562	1,713.38	2,768,854	1,588,795	312,498	589,984	902,482
2563	1,757.87	1,851,803	1,956,442	349,169	546,192	895,360
2564	1,754.04	2,801,473	1,864,631	386,697	550,146	936,843
2565	1,771.99	2,830,133	1,882,133	391,500	556,500	948,000
อัตราเพิ่ม (ร้อยละ)	3.59	4.38	6.94	9.31	-0.84	2.84
2566	1,781.55	2,845,401	1,885,401	397,000	563,000	960,000

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรมศุลกากร

2.2 ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลทางเศรษฐกิจของเป็ด

เป็ดที่เลี้ยงเป็นการค้าในปัจจุบันทั้งเป็ดเนื้อและเป็ดไข่พันธุ์ต่าง ๆ มีหลักฐานยืนยันว่าได้รับการปรับปรุงพันธุ์มาจากเป็ดมอลลาร์ด (Mallard ; *Anas platyrhyncho*) ทั้งสิ้น เช่น พันธุ์กากีแคมเบลล์ (Khaki Campbell) พันธุ์ รูแอง (Rouen) พันธุ์แบล็คอีสอินเดีย (Black East India) พันธุ์คาโยกา (Cayuga) ยกเว้นเป็ดเทศ (Muscovy ; *Cairina moschata*) เท่านั้น

2.2.1 พันธุ์เป็ด

เป็ดที่เลี้ยงเป็นการค้าในปัจจุบันแบ่งออกได้ 2 ประเภทตามวัตถุประสงค์การเลี้ยง ได้แก่ เป็ดไข่ (Egg-type duck) และเป็ดเนื้อ (Meat-type duck)

เป็ดไข่ (Egg-type duck) เป็ดพันธุ์ไข่ที่นิยมเลี้ยงกันในปัจจุบันมีได้แก่ พันธุ์กากีแคมเบลล์ (Khaki Campbell) เป็ดพันธุ์นี้พัฒนาพันธุ์โดย Adele Campbell ใน ประเทศอังกฤษตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 18 จนได้เป็นเป็ดพันธุ์ที่ให้ไข่ดกที่สุดในโลกพันธุ์หนึ่ง โดยให้ไข่ ประมาณ 300 ฟอง/ปี เป็ดกากีแคมเบลล์มีขนสีน้ำตาล แต่ขนที่หลังและปีกมีสีสลับอ่อนกว่า ปากสีดำ ค่อนข้างไปทางเขียว จะงอยปากดำ ตาสีน้ำตาลเข้ม คอส่วนบนสีน้ำตาล แต่ส่วนล่างเป็นสีกากี ขาและ เท้ามีเดียวกับสีขน แต่เข้มกว่าเล็กน้อย ตัวเมียเมื่อโตเต็มที่หนักประมาณ 2.0-2.5 กิโลกรัม เริ่มไข่เมื่อ อายุประมาณ 4

เดือนครึ่ง ตัวผู้ จะมีขนบนหัว คอ ไหล่ และปลายปีกสีเขียว ขนปกคลุมลำตัวสีเทาและ น้ำตาล ขา และเท้าสีเทาเข้ม เมื่อโตเต็มที่จะมีน้ำหนักประมาณ 2.5-2.7 กิโลกรัม

พันธุ์อินเดียนรันเนอร์ (Indian Runner) เป็ดพันธุ์นี้พบครั้งแรกในหมู่เกาะของประเทศ อินโดนีเซีย ชวา และบาหลี มีขนาดเล็ก ตัวผู้โตเต็มเมื่อโตเต็มที่มีน้ำหนักประมาณ 1.7-2.5 กิโลกรัม ตัวเมียมีน้ำหนักประมาณ 1.5-2.0 กิโลกรัม เป็ดพันธุ์นี้มีอยู่ 3 สีคือ สีขาว สีเทา และสีลาย เป็ดพันธุ์นี้มี ลักษณะเด่นประจำพันธุ์ที่แปลกกว่าเป็ดพันธุ์อื่นๆ คือ ขนยืนคอยึดตั้งตรง ลำตัวเกือบตั้งฉากกับพื้น คล้ายกับนกเพนกวิน ไม่ค่อยบินแต่จะเคลื่อนที่โดยการเดินและวิ่งมากกว่า ปากสีเหลือง แข็งและเท่าสี ส้ม ตัวเมียเริ่มให้ไข่เมื่ออายุประมาณ 4 เดือนครึ่ง ให้ไข่ฟองโตและไข่น ให้ไข่ประมาณ 150-200 ฟอง/ปี

พันธุ์พื้นเมือง (Native ducks) เป็ดที่นิยมเลี้ยงกันในประเทศไทยมี 2 สายพันธุ์ ได้แก่ เป็ดนครปฐม เลี้ยงกันมากในเขตจังหวัดนครปฐม เพชรบุรี สุพรรณบุรี และใน พื้นที่ลุ่มในภาคกลางซึ่งเป็นเขตน้ำจืด ตัวเมียมีขนสีลายกบอ้อย ปากสีเทา เท้าสีส้ม ตัวผู้จะมีสีเขียวแก่ ตั้งแต่คอไปถึงหัว รอบคอมีวงรอบสีขาว ออกสีแดง ลำตัวสีเทา ปากสีเทา และเท้าสีส้ม ตัวผู้เมื่อโตเต็มที่ จะมีน้ำหนักประมาณ 3.0-3.5 กิโลกรัม ตัวเมียมีน้ำหนักประมาณ 2.5-3.0 กิโลกรัม เริ่มให้ไข่เมื่ออายุ ประมาณ 6 เดือน

เป็ดปากน้ำ เลี้ยงกันมากในเขตจังหวัดสมุทรปราการ สมุทรสาคร ฉะเชิงเทรา และชลบุรี ตลอดจนจังหวัดที่อยู่ชายฝั่งทะเลอื่น ๆ เป็นเป็ดพันธุ์เล็ก ตัวเมีย มีปาก เท้า และขนปกคลุมลำตัวสีดำ ออกสีขาว ส่วนตัวผู้จะมีขนบนหัวและคอสีเขียวเป็นเลื้อบบาง มีลำตัวขนาดเล็กกว่าเป็ดนครปฐม ให้ไข่ฟองเล็กกว่า เริ่มให้ไข่เมื่ออายุประมาณ 5-6 เดือน ตัวผู้ของเป็ดพันธุ์พื้นเมืองนิยมนำไปเลี้ยงเป็นเป็ดเนื้อ ในปัจจุบัน เป็ดไข่นพันธุ์พื้นเมืองหายากมาก เนื่องจากมีการผสมพันธุ์ข้ามพันธุ์ระหว่างพันธุ์กากี แคมเบลล์กับพันธุ์พื้นเมืองมาเป็นระยะเวลายาวนาน จนกลายเป็นเป็ดพันธุ์ผสม

พันธุ์ลูกผสมกากีแคมเบลล์กับพันธุ์พื้นเมือง (Kaki x Native duck) นิยมเลี้ยงกันมากกว่าพันธุ์แท้ เนื่องจากเลี้ยงง่าย ทนทานต่อโรคและสภาพแวดล้อม ให้เนื้อมากและให้ไข่ดก ให้ไข่ประมาณ 260 ฟอง/ปี จะเริ่มให้ไข่เมื่ออายุประมาณ 5-6 เดือน

เป็ดเนื้อ (Meat-type duck) เป็ดเนื้อที่นิยมเลี้ยงในประเทศไทยมีดังนี้

พันธุ์ปักกิ่ง (Pekin duck) มีต้นกำเนิดมาจากประเทศจีน รูปร่างใหญ่ ลำตัวกว้างลึก และหนา ขนปกคลุมลำตัวมีสีขาวล้วน ปากสีเหลืองส้ม แข็งและเท่าสีแดงส้ม ผิวหนังสีเหลือง เป็นเป็ดที่เลี้ยงง่าย ไม่มีนิสัยฟักไข่ ให้ไข่ประมาณ 160 ฟอง/ปี เปลือกไข่สีขาว เมื่อโตเต็มที่ตัวผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 4 กิโลกรัม ตัวเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 3.5 กิโลกรัม จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อเลี้ยงภายในโรงเรือนที่การจัดการดี นอกจากให้เนื้อแล้ว ขนเป็ดปักกิ่งยังเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมผลิตลูกขนไก่ และใช้ทำฟูกที่นอนได้ด้วย

เป็ดเทศ (Muscovy) พบครั้งแรกในทวีปอเมริกาใต้ เป็นเป็ดอีกพันธุ์หนึ่งต่างหาก เป็นเป็ดที่ให้เนื้อมากแต่ให้ไข่น้อยและโตค่อนข้างช้า ตัวเมียมีนิสัยชอบฟักไข่และเลี้ยงลูกเก่ง เมื่อโตเต็มที่ตัวผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 4-4.5 กิโลกรัม ตัวเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 3.0-3.5 กิโลกรัม เนื่องจากเป็นเป็ดที่โตช้าและตัวผู้กับตัวเมียมีน้ำหนักแตกต่างกันมากจึงไม่ค่อยมีผู้นิยมเลี้ยงเป็นการค้า อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาผสมพันธุ์กับเป็ดพันธุ์อื่นจะให้ลูกเป็นหมันแต่มีอัตราการเจริญเติบโตดีขึ้นและความแตกต่างของน้ำหนักตัวระหว่างเพศผู้และเพศเมียจะน้อยลง เช่น เป็ดพันธุ์บิวฉ่าย (Mule duck) เป็ดเทศที่พบในประเทศไทยมี 2 สี ได้แก่ ชนิดที่มีสีขาว และชนิดที่มีสีดำ ทั้ง 2 ชนิด ที่บริเวณใบหน้าและเหนือจมูกมีหนังย่นสีแดง เป็ดเทศชนิดที่มีสีขาวจะมีขนสีขาว ผิวน้ำสีขาวแข้งสีเหลืองส้มอ่อนปากมีสีเนื้อ ส่วนชนิดที่มีสีดำจะมีขนที่หน้าอก ลำตัวและหลังสีดำประขาว ปากสีชมพู แข้งสีเหลืองหรือตะกั่วเข้ม

พันธุ์บิวฉ่าย (Mule duck) เป็นเป็ดพันธุ์ผสมระหว่างเป็ดเทศกับเป็ดธรรมดา ลูกเป็ดที่ได้จะเป็นหมันทั้งเพศผู้และเพศเมีย ลักษณะเด่นของเป็ดบิวฉ่าย ได้แก่ มีโครงร่างใหญ่ เลี้ยงง่าย โตเร็ว ไม่ร้องเสียงดัง ทนทานต่อโรคและสภาพแวดล้อม เนื้อมีรสชาติดีกว่าเป็ดธรรมดา เนื้อแน่น มีไขมันต่ำชาวจีนนิยมบริโภคมานานหลายร้อยปีแล้ว ใช้เวลาประมาณ 3.5-4 เดือน ตัวผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 3-3.5 กิโลกรัม ส่วนตัวเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 2.5-3 กิโลกรัม

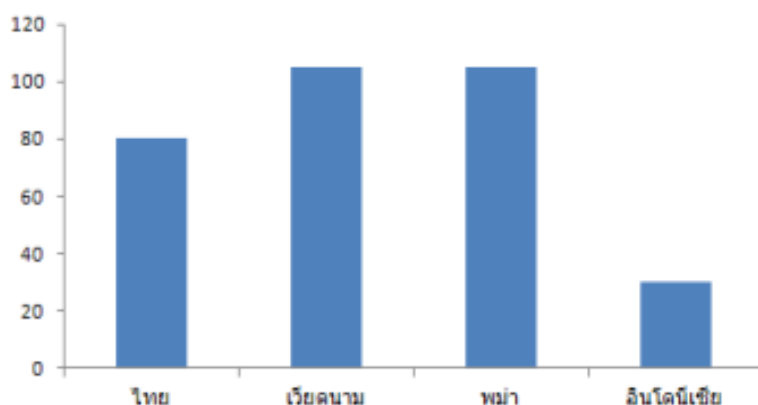
พันธุ์ลูกผสมเพื่อการค้า (Hybrid breed) การเลี้ยงเป็ดเนื้อเพื่อการค้ามีการนำมาเผยแพร่และส่งเสริมโดยบริษัทเอกชน มีการพัฒนาระบบการเลี้ยงให้ทันสมัยเช่นเดียวกับการเลี้ยงไก่กระທง มีเลี้ยงกันอยู่หลายพันธุ์ในขณะนี้ เช่น พันธุ์เซอร์วอลเลย์ พันธุ์ทีเกล พันธุ์ฮักการ์ด พันธุ์เลคการ์ด ฯลฯ ซึ่งส่วนใหญ่มีการพัฒนาพันธุ์โดยมีพันธุ์ปีกกึ่งผสมอยู่ด้วย

เป็ดเทศพันธุ์บินทร์บุรีเป็นเป็ดเทศพันธุ์เนื้อพันธุ์แท้ที่กรมปศุสัตว์ได้วิจัยพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์มาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปีพ.ศ. 2534 การปรับปรุงเริ่มจากเป็ดพันธุ์บาร์บารีจากประเทศฝรั่งเศส โดยสถาบันบำรุงพันธุ์สัตว์บางปะกงได้ทำการขยายพันธุ์คัดเลือกปรับปรุงพันธุ์ให้สามารถเลี้ยงง่ายขยายพันธุ์ได้ดี โตเร็ว สามารถเลี้ยงส่งตลาดได้ในระยะเวลา 12 สัปดาห์ต้านทานต่อโรค และปรับตัวเข้ากับสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย และสามารถผลิตได้จำนวนมากในเชิงอุตสาหกรรม (กรมปศุสัตว์, 2559)

2.2.2 การบริโภค

เป็ดเป็นสัตว์ปีกอีกประเภทหนึ่งที่เลี้ยงดูง่าย สามารถกินอาหารตามธรรมชาติได้ และให้ผลผลิตไข่จำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่นิยมเลี้ยงรองมาจากไก่ โดยเฉพาะในปัจจุบันมีพันธุ์เป็ดไข่เชิงการค้าและพันธุ์ที่ได้รับการพัฒนาให้สามารถปรับตัวกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทยได้ดีขึ้น ส่งผลให้มีจำนวนเป็ดที่เลี้ยงในประเทศไทยในปัจจุบัน (มีนาคม พ.ศ. 2564) รวม 17,737,537 ตัว

แบ่งเป็นเป็ดไข่ 16,819,398 ตัว และเป็ดเนื้อ 9,181,539 ตัว อีกทั้งในประเทศไทยมีความต้องการบริโภคเนื้อเป็ดในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับประเทศในแถบ AEC (บุญเมธธา 2558)



ภาพประกอบ 1 ความต้องการบริโภคเนื้อเป็ดแยกตามประเทศแถบ AEC (พันตัน)

ที่มา : Bangkok Ranch, BR

2.3 ขยะอาหาร

ขยะอาหารเกิดจากอาหารที่เหลือจากการบริโภคทั้งในครัวเรือน อาหารที่เหลือจากการจำหน่ายในร้านค้าปลีก อาหารบุฟเฟต์และอาหารที่ใช้เพื่อปรุงแต่งงานในร้านอาหารหรือโรงแรม ขยะที่สร้างขึ้นในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรม จากกระบวนการผลิตที่มีวัตถุดิบเหลือใช้ และการจัดเก็บวัตถุดิบที่ไม่ดีทำให้เกิดการเน่าเสีย จากสถานการณ์ปัญหาขยะอาหารเริ่มกลายเป็นประเด็นใหญ่ทั่วโลก ที่ทุกประเทศกำลังร่วมมือกันในการลดการสร้างขยะจากอาหาร เพราะแท้จริงแล้วอาหารที่ผลิตออกมาเพียงพอสำหรับคนทั้งโลก แต่ไม่สามารถส่งไปถึงมือผู้ที่ต้องการหรือขาดแคลนอาหารได้ อาหารส่วนเกินเหล่านี้จึงเกิดการเน่าเสียและถูกทิ้ง สร้างมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการสร้างแก๊สเรือนกระจก อย่างเช่น แก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่ประเทศไทยก็พบปัญหานี้เช่นกัน โดยขยะอาหารคิดเป็น 64% ของขยะทั้งหมด หรือ 254 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ซึ่งขยะส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย เนื่องจากการแยกขยะที่ไม่ถูกต้อง การจัดการขยะที่ใช้การฝังกลบรวม และไม่มีระบบจัดการที่ถูกสุขาภิบาล (กะรัตลักษณ์, 2562)

2.4 ถ่านกระดูก

เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสีดำและเป็นเม็ดเล็ก ๆ ที่ผลิตโดยกระดูกสัตว์ที่ไหม้เกรียม ส่วนประกอบของมันแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวิธีการทำ อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่ประกอบด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต (หรือไฮดรอกซีอะพาไทต์) 57–80% แคลเซียมคาร์บอเนต 6–10% และคาร์บอน 7–10% (Fawell, 2006) ใช้เป็นหลักในการกรองและกำจัดสี

ไตรแคลเซียมฟอสเฟตในถ่านกระดูกสามารถใช้กำจัดฟลูออไรด์และไอออนของโลหะออกจากน้ำได้ ทำให้มีประโยชน์สำหรับการบำบัดน้ำดื่ม ถ่านกระดูกเป็นสารกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำที่เก่าแก่ที่สุดที่รู้จักและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1940 ถึง 1960 (Horowitz, 1967) เนื่องจากสามารถผลิตได้ในราคาถูกและใช้ในประเทศกำลังพัฒนาบางประเทศ เช่น แทนซาเนีย (Mjengera, 2003) ถ่านกระดูกมักมีพื้นที่ผิว ต่ำ กว่าถ่านกัมมันต์แต่มีความสามารถในการดูดซับสูงสำหรับโลหะบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกที่มาจากกลุ่ม 12 (ทองแดงสังกะสีและแคดเมียม) (Ko, 2000) ไอออนโลหะที่มีพิษสูงอื่นๆ เช่น สารหนู และตะกั่ว อาจถูกกำจัดออกไปด้วย ตัวอย่างที่ใช้ได้จริงของการใช้ถ่านกระดูกในการทำน้ำให้บริสุทธิ์นั้นแสดงให้เห็นโดยการใช้ไนโนฟิลเตรชันในแทนซาเนีย

2.5 ถ่านชาร์ หรือ ถ่านไบโอชาร์

2.5.1 นิยามและความหมาย

ไบโอชาร์ (Biochar) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวลหรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (เช่น ต้นไม้เศษใบไม้กิ่งไม้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ตอซังซังข้าวโพดเปลือกถั่ว เปลือกผลไม้แห้งมันสำปะหลัง เศษอาหารในครัวเรือน หรือมูลสัตว์เป็นต้น) กระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนนี้เรียกว่า ไพโรไลซิส (pyrolysis)

ไพโรไลซิส เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยจำกัดอากาศหรือปราศจากอากาศ ที่มีการ ดำเนินการอยู่ 2 วิธีคือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (slow pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมงและใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศา เซลเซียส (°C) ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (fast pyrolysis) ที่ ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาทีใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500-1,000 °C ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ จะได้ผลผลิตที่แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ น้ำมัน (bio-oil) ก๊าซ (bio-gas) และ ถ่านชีวภาพ (bio-char) ตามวัตถุประสงค์ของการผลิต (พินิจภณ ปิตุยะ, 2557) ผลพลอยได้จากกระบวนการนี้ นอกจากได้ถ่านชีวภาพแล้ว ยังประกอบด้วยก๊าซ สังเคราะห์ (syngas หรือ synthesis gas) ซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H₂), ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซมีเทน (CH₄) นอกจากนั้นยังมีสารทาร์ (tars) กรดอินทรีย์ (organic acids) กรดไพโรลิกเนียส (pyrolic acid) หรือน้ำส้มคว้นไม้และความร้อนส่วนเกิน

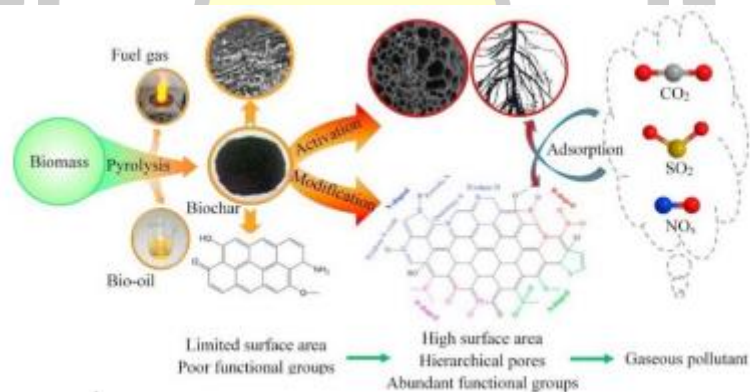
ตาราง 3 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	ถ่าน (Char)	ของเหลว (Liquid)	แก๊ส (Gas)
แบบช้า (Slow pyrolysis)			
- ใช้อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 500 °C)	35%	30%	35%
- ใช้เวลานานเป็นชั่วโมง			
แบบเร็ว (Fast pyrolysis)			
- ใช้อุณหภูมิปานกลาง (500 - 600 °C)	12%	75%	13%
- ใช้เวลาน้อยหรือสั้น (เป็นวินาที)			

ที่มา : เอกสารองค์ความรู้ เรื่อง ถ่านชีวภาพ

2.5.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบ

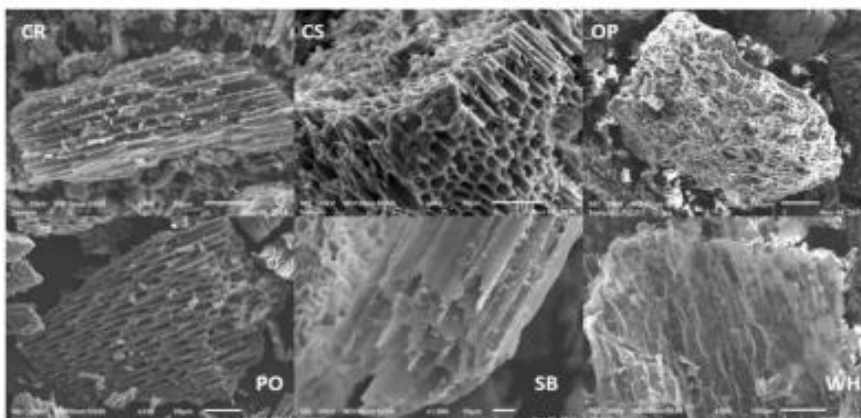
คุณสมบัติและองค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะแตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป ได้แก่ ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น ๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนขณะให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยไม่มีออกซิเจนและไฮโดรเจน (Chen, 2017)



ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านไบโอชาร์

ที่มา : (Chen, 2017)

ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุน มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์และซีลีเนียม แต่องค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น อุณหภูมิอุณหภูมิและระยะเวลาเป็นต้น (Lehmann, 2009)



ภาพประกอบ 3 ภาพถ่ายจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของตัวอย่างถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 450 × (CR, CS), 170 × (OP), 330 × (PO), 1000 × (SB) และ 200 × (WH) (CR = ผงถ่าน CS = กะลามะพร้าว; OP = เปลือกส้ม; PO = ทะลายปาล์มน้ำมัน; SB = กากชานอ้อย WH = ผักตบชวา)
ที่มา : (Lehmann, 2009)

ตาราง 4 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ	คุณสมบัติ
1. องค์ประกอบของธาตุ	คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์
2. ความคงตัว	สลายตัวได้ช้ามีอายุการใช้งานได้ยาวนาน
3. พื้นที่ผิวจำนวนมาก	ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนพื้นที่ผิวทั้งภายนอกและภายในรูพรุนได้
4. มีความพรุนจำนวนมาก	ช่วยกักเก็บน้ำทำให้ดินมีรูพรุนไม่จับตัวแน่นและเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์
5. มีสถานะเป็นประจุลบ	ช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกทำให้มีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ ปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืช ช่วยปรับค่า pH ของดิน และน้ำ และช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาโลกร้อน

ที่มา : เอกสารองค์ความรู้ เรื่อง ถ่านชีวภาพ

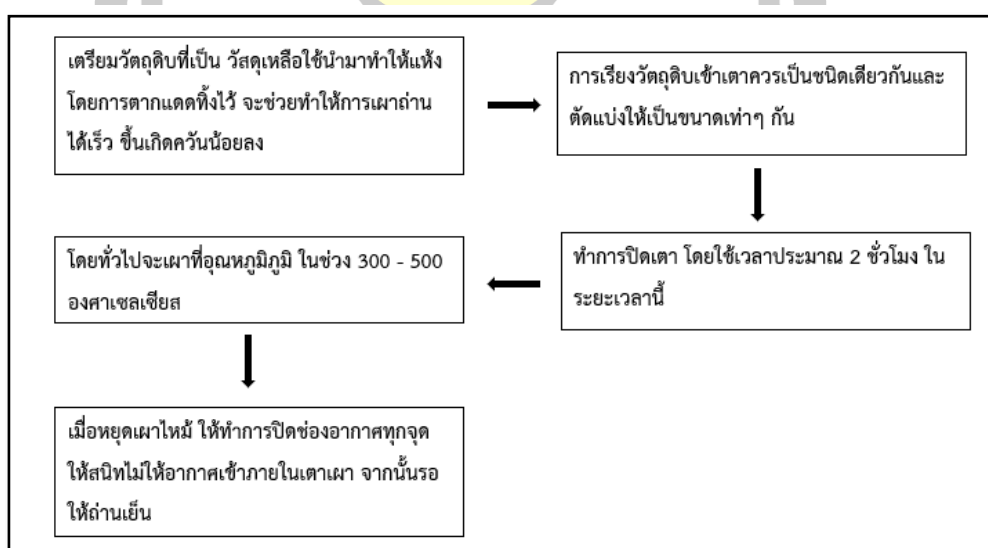
2.6 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่ เปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงที่มี ค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และ ก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดย สัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับ

กับปัจจัย หลายประการ ได้แก่ สภาพะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบ ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

2.6.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำ ปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลผลิตจากไพโรไลซิสแบบช้ามีส่วนเป็นของเหลว 30-50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25-35 เปอร์เซ็นต์ ไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (carbonization pyrolysis) และ ไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชัน ไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาสั้น โดยใช้ เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลผลิตเป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการทำอาหาร ส่วนผลผลิตในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออก สู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15-30 นาที ได้ผลผลิตครบทั้ง สามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลผลิตในส่วน ของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิง ในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขี้ หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมี ที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น (กุลนันท์ และอมรชัย, 2558)



ภาพประกอบ 4 ขั้นตอนการผลิตถ่านไบโอชาร์

ที่มา : <http://www.cusri.chula.ac.th/wp-content>

2.7 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับ เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลาย ปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ อาทิ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา ระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือ ของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และ เป็นวัฏภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้น เนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของ ของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี (วรวิทย์, 2558)

2.7.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทาง ไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารใน ของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่ มีแรงกระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะ ซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและ เกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2.7.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำ ปฏิกิริยาเคมีกับ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต

ของสารที่ถูกดูดซับ มี พลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

2.8 ชนิดของไอโซเทอม

2.8.1 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

2.8.2 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

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

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

4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียง ได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็น อิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณี ที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นชั้นเดียวเท่านั้น สมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
 q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g)

- b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.1 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

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

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2) 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

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

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

2.8.3 ไอโซเทอมแบบฟรุนดิส (Freundlich isotherm)

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

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

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

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

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

2.8.4 ไอโซเทอมแบบทอธ (Toth isotherm)

แบบจำลองแบบทอธเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองฮอลแลงเมียร์ และสามารถ ใช้ได้ในทั้งระบบที่มีความดันต่ำและความดันสูง

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

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

2.8.5 ไอโซเทอมแบบเรดลิค-เพเทอร์สัน (Redlich-Peterson isotherm)

แบบจำลองของเรดลิค-เพเทอร์สันเป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานของแลงเมียร์ และฟรุนดิสแตงนั้นกลไกการดูดซับจึงเป็นการผสมผสานแบบจำลองนี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวในอุดมคติ

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

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

2.8.6 ไอโซเทอมแบบหลิว (Liu isotherm)

แบบจำลองของหลิวเป็นแบบจำลองที่ได้จากการรวมกันของแลงเมียร์และฟรุนดิส แต่สมมติฐานของแบบจำลองแลงเมียร์และสมมติฐานการดูดซับที่ไม่มีที่สิ้นสุดของแบบจำลองของฟรุนดิส จะถูกทิ้งไป แบบจำลองของหลิวคาดการณ์ว่าตำแหน่งของตัวดูดซับไม่สามารถมีพลังงานเท่ากันได้ ดังนั้นตัวดูดซับจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันที่ไม่เลกุลต้องการยึดเกาะ อย่างไรก็ตามความอิ่มตัวของตำแหน่งตัวดูดซับควรเกิดขึ้นแตกต่างจากแบบจำลองฟรุนดิส

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

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

2.8.7 ไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm)

สมการของเทมคินเป็นการอธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งถูกพัฒนามาจากกระบวนการที่ การเปลี่ยนแปลงของความร้อนในการดูดซับ และมีรูปแบบสมการ (2.9) และ (2.10)

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

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

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

2.9 จลพลศาสตร์การดูดซับ

2.9.1 จลพลศาสตร์เคมี

สมการจลพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลพลศาสตร์การดูดซับด้วย (วรวิทย์, 2558)

2.9.2 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order, PFO)

เป็นสมการที่อธิบายภายใต้สมมติฐานของการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วการดูดซับโดยใช้สมการจลพลศาสตร์การดูดซับเองของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้ (วัชนิดา และอดิศักดิ์, 2561)



โดยที่ A คือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือ ตัวดูดซับ (Adsorbent) และ A*S คือสารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ได้ดังสมการที่ (2.12)

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

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

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (1) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ ถึง $q_e = t$ จะได้สมการที่ (2.13)

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

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้สมการที่ (2.14)

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

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

2.9.3. สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order, PSO)

เป็นสมการที่อธิบายภายใต้การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



สามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม ได้ดังสมการที่ (2.16)

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

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

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.16) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = t$ จะได้สมการที่ (2.17)

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

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

2.10 แบบจำลอง Elovich

สมการของ Elovich ได้รับการพัฒนาโดย Zeldowitsch (Zeldowitsch, 1934) อย่างกว้างขวางเพื่อกำหนดการดูดซับก๊าซบนวัสดุที่เป็นของแข็ง (Augustus Newton Ebelegi 2020) สมการเชิงประจักษ์กึ่งนี้ยังใช้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำหนดจลนพลศาสตร์ของลำดับที่สองสมมติว่าพื้นผิวที่เป็นของแข็งของแข็งนั้นมีความหลากหลายแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสมการนี้ไม่แนะนำให้ใช้กลไกการดูดซับที่แน่นอน แบบจำลองนี้กำหนดจลนศาสตร์ของกระบวนการทาง สมการ Elovich แทบจะไม่ได้รับการฝึกฝนเพื่อการดูดซับสถานะของเหลวสมการ Elovich เป็นสมการอัตราอันดับหนึ่งตามความสามารถในการดูดซับซึ่งเขียนดังนี้

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

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

t คือ เวลาติดต่ (นาที่)

α คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แสดงถึงอัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg / g นาที่)

β คือ สัมประสิทธิ์ Elovich แทนค่าคงที่การปลดปล่อย (g / mg)

2.11 Fractal-like pseudo first order model (FLPFO)

แฟร็กทัล p เหมือนหลอกแรก (FL-PFO) ยิ่งไปกว่านั้นตามที่กล่าวโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ Azizian เกี่ยวกับสมการอัตรา Langmuir (Azizian, 2004) และการได้มาของแบบจำลองคำสั่งผสม 1,2 โดย Marczewski (Marczewski, 2010) แบบจำลองลำดับแรกหลอกสามารถมาจากแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir (Azizian, 2004) หรือ MOE (Marczewski, 2010) ภายใต้การพิจารณาที่แตกต่างกัน ดังนั้นรูปแบบที่เหมือนเศษส่วนของมันจึงสามารถได้มาจาก Fractal - เช่น Langmuir kinetic model หรือ Fractal - เช่น MOE

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

เมื่อ	K_{opf}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราหกลำดับแรก (1 / นาที)
	k'_{FPO}	คือ เศษส่วน - เช่นค่าสัมประสิทธิ์อัตราจลน์ของลำดับแรกหกลอก (1 / นาที)
	t	คือ เวลาติดต่อ (นาที)
	h	คือ อัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg / g min)

2.12 Fractal-like pseudo second order (FLPSO)

เศษส่วนเหมือนหกลลำดับที่สอง (FL-PSO) เศษส่วนอีกครั้งเช่นรูปแบบของรูปแบบคำสั่งหกลที่สองสามารถได้มาจากเศษส่วน - เช่นแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ Langmuir หรือเศษส่วน เช่น MOE ดังต่อไปนี้ (Haerifar, 2012)

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

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

2.13 แบบจำลองจลนพลศาสตร์

เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่ นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudochemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง สมการ pseudo-first order และpseudo-second order แสดงดังสมการ (2.21) และ (2.22) ตามลำดับ

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

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

การศึกษาจลนพลศาสตร์การคายช่วยอธิบายกลไกการดูดซับและการแยกสารถูกดูดซับออกมาจากวัสดุดูดซับ สามารถใช้สมการ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยตัดแปลงให้อยู่ในรูปสัดส่วนของ q/q_e ตามสมการโดยหากข้อมูลการทดลองการคายสารนอนิลฟีนอลจากเม็ดราตริงไรซ์วิต สอดคล้องกับสมการ pseudo first-order จะหมายถึงอัตราการคายถูกจำกัดด้วยการทำลายพันธะที่บริเวณผิวซึ่ง สารถูกดูดซับยึดกับวัสดุดูดซับที่บริเวณผิว อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายแปรผันตรงกับความเข้มข้น เมื่อจัดแจงสมการที่ (2.23) จะได้ดังสมการ (2.24)

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

อินทิเกรตสมการ (2.23) ภายใต้ขอบเขต $t = 0, q=0$ ถึง $t = t, q = q$ ได้สมการ (2.24)

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

สำหรับสมการ pseudo second-order หลังจากถูกจัดรูปสมการและอินทิเกรตแล้วจะได้สมการ (2.25) ซึ่งแสดงว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายแปรผันตรงกับ กำลังสองของตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ไม่ถูก

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

แบบจำลอง pore diffusion model (การแพร่ออกจากรูภายในของอนุภาค) เป็นการอธิบายกลไกการแพร่ออกจาก วัสดุดูดซับที่มีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งมีรัศมี, r โดยใช้สมมติฐานที่ว่า ความเข้มข้นภายนอกของผิวสัมผัสวัสดุดูดซับต้องมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการจะสอดคล้องกับการใช้ข้อมูลทดสอบการคายในช่วงเริ่มต้น ซึ่งยังเป็นช่วงที่ความเข้มข้นของสารละลายยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมาก โดยเส้นกราฟจะอยู่ในรูปเส้นโค้งพาราโบลา ตามสมการ (2.26) เพื่อคำนวณหาอัตราการแพร่ (diffusivity rate; D/r^2)

$$\frac{q}{q_e} = \sqrt{\frac{6Dt}{r^2\pi}} \quad (2.26)$$

2.14 ทองแดง

ทองแดงเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของทองแดงบริสุทธิ์หรือสินแร่ โดยรวมตัวอยู่กับหินทราย ดิน หรือดินเหนียว สินแร่ทองแดงแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ๆ 3 พวกด้วยกัน คือ

1. ทองแดงบริสุทธิ์ตามธรรมชาติซึ่งมีทองแดงอยู่ถึงร้อยละ 99
2. แร่ซัลไฟด์ (sulfide ores) ทองแดงรวมตัวกับกำมะถันเป็นทองแดงซัลไฟด์ ในแร่บางชนิดอาจมีธาตุอื่น เช่น ดีบุก หรือเหล็กปนอยู่ด้วย สินแร่ทองแดงในรูปของซัลไฟด์ที่สำคัญๆ ได้แก่ คาลโคไพไรต์ (chalcopyrite) โคเวลไลต์ (covellite) อินาร์ไจต์ (enargite) เททราไฮโดรต์ (tetrahedrite) และบอร์ไนต์ (bornite) เป็นต้น แร่เหล่านี้มีทองแดงอยู่ร้อยละ 40-80
3. แร่ออกไซด์ (oxide ores) ทองแดงรวมตัวกับออกซิเจนอยู่ในรูปของออกไซด์ แร่เหล่านี้ได้แก่ คิวไพรต์ (cuprite) เทนอไรต์ (tenorite) อะซูไรต์ (azurite) บรอกาไนต์ (brochantite) ฯลฯ ซึ่งมีทองแดงอยู่ร้อยละ 45-89

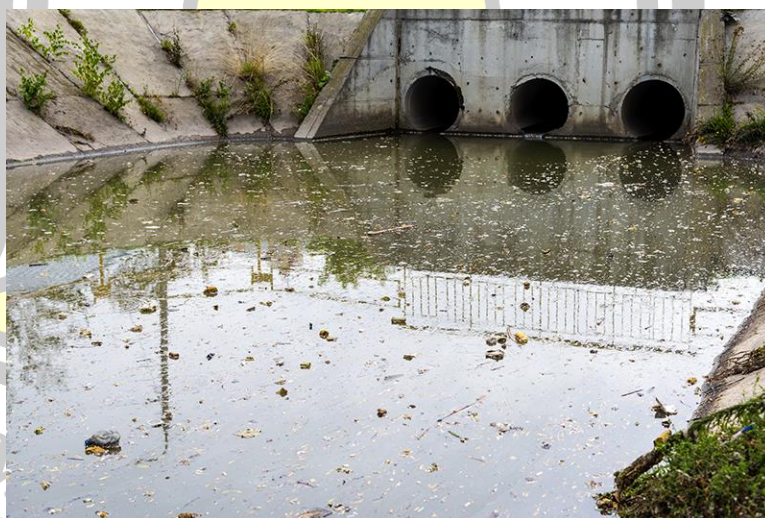
แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญๆ ของโลก ได้แก่ เทือกเขาร็อกกี (Rocky) ในประเทศสหรัฐอเมริกา แนวลาดด้านตะวันตกของภูเขาแอนดีส (Andes) ในประเทศชิลีและเปรู เทือกเขาในทวีปแอฟริกา บริเวณประเทศคองโก ตอนเหนือของประเทศโรดีเชีย และประเทศแคนาดา แหล่งแร่สำคัญเหล่านี้ มีแร่ทองแดงรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของทองแดงทั่วโลก แหล่งแร่ทองแดงที่นับว่าใหญ่ที่สุดอยู่ในประเทศชิลี นอกจากนี้ ยังมีในบางแห่งของทวีปยุโรป ประเทศออสเตรเลีย และแอฟริกาใต้

ประเทศไทยมีแร่ทองแดงอยู่โดยทั่วไป ทั้งทางภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งขงพระและแหล่งจันทิก จังหวัดนครราชสีมา ที่อำเภอวัง จังหวัดลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ อำเภอโคกกระเทียม จังหวัดลพบุรี

2.15 การปนเปื้อนของทองแดงในสิ่งแวดล้อม

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้นคือการรั่วไหลปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้น และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม เราใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้

เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ ในชีวิตประจำวัน คนเรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางอาหาร หรือดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานที่ขาดจิตสำนึก ซึ่งมักจะลักลอบเทของเสียลงดินหรือลงแม่น้ำ กำจัดกากของเสียอย่างผิดวิธี ทั้งนี้เนื่องจากต้องการลดรายจ่าย โลหะหนักบางชนิดสามารถให้ทั้งคุณและโทษต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นกับชนิดของสิ่งมีชีวิตและปริมาณที่ได้รับเข้าไป ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียต้องการโคบอลต์ (Cobalt-Co) ทองแดง (Copper-Cu) และแมงกานีส (Manganese-Mn) โมลิบดีนัม (Molybdenum-Mo) แวนาเดียม (Vanadium-และสังกะสี (Zinc-Zn) ในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะที่มากเกินไปจะสร้างสิ่งแวดล้อมที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์เหล่านี้ ส่งผลให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท (Mercury-Hg) และแคดเมียม (Cadmium-Cd) จัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย และถูกจัดให้ขึ้นบัญชีดำ (black list) เนื่องจากมีพิษร้ายแรงมากต่อมนุษย์ (พรพรรณ, 2549) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดทองแดงจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น กระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี กระบวนการดูดซับ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (อนิสา และคณะ, 2555) โดยกระบวนการต่างๆ เหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง อีกทั้งยังต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 5 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ที่มา : <https://www.greennetworkthailand.com>

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัชฎาภา เกตุวงศ์ และคณะ (ม.ป.พ.) ได้ทำการศึกษาสารสกัดโคโคซานจากเปลือกปุม้า สามารถดูดซับทองแดง (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยในการทดลองได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับทองแดง (II) ไอออน พบว่าสภาวะที่เกิดการดูดซับได้ดีที่สุด คือ ปริมาณโคโคซาน 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เวลาการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่า pH 5 การศึกษาจลศาสตร์ของ การดูดซับทองแดง (II) ไอออน โดยประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่าจลศาสตร์ ของการดูดซับทองแดง (II) ไอออน จากเปลือกปุม้าสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ชยพงศ์ ชื่นธีรพงศ์ (2556) การศึกษาการดูดซับโลหะทองแดง (Cu^{2+}) ในสารละลาย โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่าง Zeolite NaY ที่เตรียมได้ กับตัวดูดซับจากธรรมชาติ (เปลือกมะพร้าว) โดยทำการศึกษาอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย เวลาในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ และอุณหภูมิของสารละลาย โดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี ในการวัดปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด พบว่า การดูดซับทองแดงด้วย Zeolite NaY จะสามารถดูดซับได้สูงสุดที่ความเข้มข้น 50 mmol/L ใช้เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 40 °C สำหรับเปลือกมะพร้าวสามารถ ดูดซับได้สูงสุดที่ความเข้มข้น 40 mmol/L ใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 10 °C โดยมีความจุการดูดซับเท่ากับ 1.4931 และ 0.2006 mmol/g ตามลำดับ โดยที่ Zeolite NaY เป็นสารที่มีรูพรุนขนาดเล็กและจำนวนมาก ทำให้มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าตัวดูดซับจากธรรมชาติประมาณ 7 เท่า

ฐิตียา แซ่ปึง และคณะ (2558) เป็นการศึกษาความสามารถของเปลือกส้มโอในการดูดซับทองแดง (II) จากสารละลายโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ปริมาณเปลือกส้มโอที่ 0.25 0.5 1.0 และ 1.5 กรัม ปริมาตรของสารละลายทองแดง (II) 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง (II) ที่ 25 50 100 150 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการเขย่าที่ 30 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที ความเร็วรอบของการเขย่า 50 100 150 และ 200 รอบต่อนาที และพีเอชที่ 3.0 - 7.0 วิเคราะห์ปริมาณทองแดงไอออนด้วยเครื่อง Flame Atomic Adsorption Spectrophotometer สภาวะเหมาะสมที่วิจัยความสามารถในการดูดซับคือ ปริมาณเปลือกส้มโอ 0.5 กรัม สารละลายทองแดงไอออนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ระยะเวลา 240 นาที ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0 และพบว่าความสามารถในการดูดซับทองแดงไอออนเท่ากับ 11.39 $\pm$ 0.22 มิลลิกรัมต่อกรัม

สุดารัตน์ สมบัติศรี และคณะ (2558) งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดยใช้ไฟโบรอินที่ได้จากเศษรังไหม โดยการทดลองการดูดซับทำในถังปฏิกรณ์แบบกะและศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อการดูดซับทองแดง ประกอบด้วย พีเอชของสารละลาย เวลาในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ

และความเข้มข้นของทองแดง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 6 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม ผลการวิจัยพบว่า ไฟโบรอิน สามารถดูดซับทองแดงได้ร้อยละ 98 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเพื่อคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ ความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุล และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่า สอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และเมื่อนำแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช มาอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับและค่าคงที่ไอโซเทอม พบว่าผลการทดลอง ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับการดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขี้ ของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มีไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 9 จะทำให้ โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง



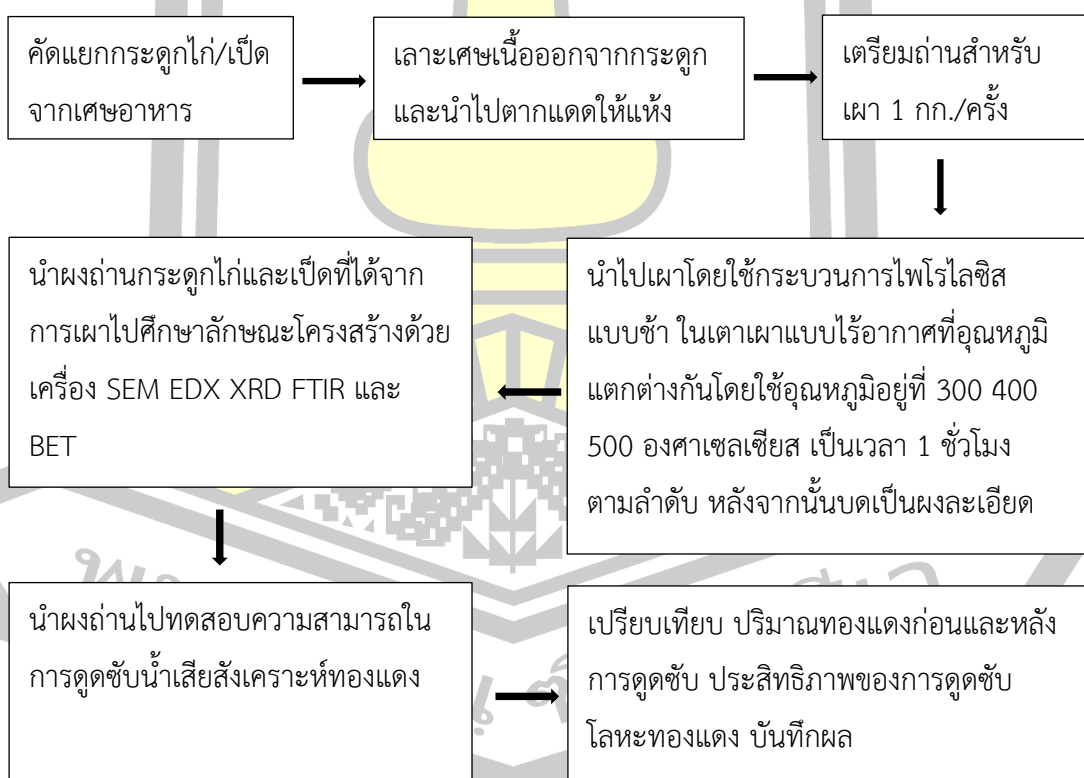
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่ทำการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษารายละเอียดของ การกำจัดทองแดงในสารละลายกรดด้วยถ่านชาร์จากกระดุกไก่และเป็ดที่เตรียมด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า ดำเนินการเผาถ่านชาร์ไร้อากาศที่ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ดำเนินการทดลองงานวิจัยห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ที่ติดศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคามและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 แผนผังวิธีการดำเนินการ

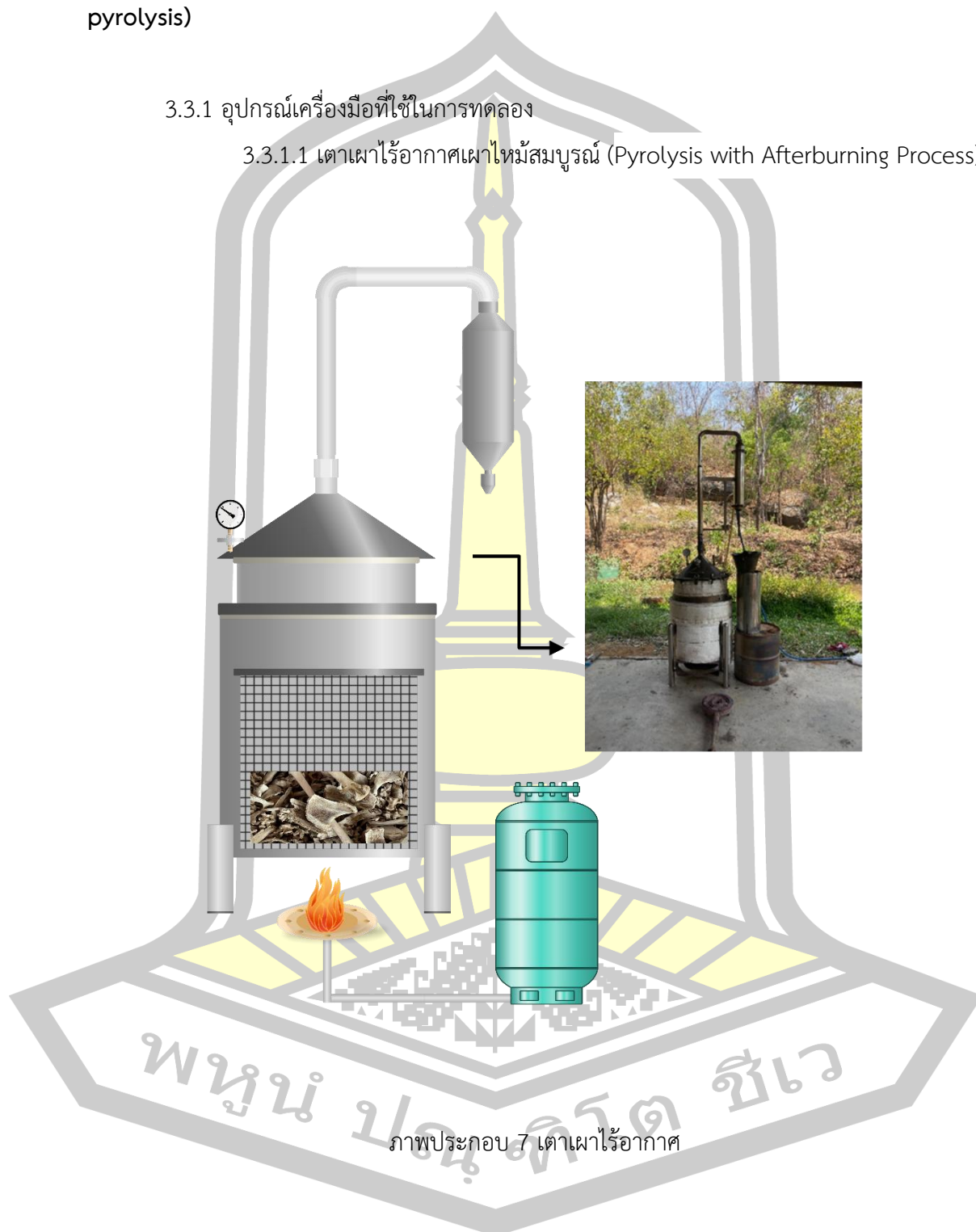


ภาพประกอบ 6 แผนผังวิธีการดำเนินการ

3.3 การเตรียมถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

3.3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 เตาเผาไร้อากาศเผาไหม้สมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process)



3.3.2 สารเคมีและวัสดุดิบ

3.3.2.1 กระดูกไก่และกระดูกเป็ดตากแห้ง



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 8 กระดูกตากแห้งสำหรับการเผา

(ก) กระดูกไก่ตากแห้ง (ข) กระดูกเป็ดตากแห้ง

3.3.2.2 เครื่องซังไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.3.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรดเบส (pH Meter)

3.3.2.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.3.2.5 ควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

3.3.2.6 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.3.2.7 กระดาษกรอง GF/C

3.3.2.8 ชุดกรอง ประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม. และขวดกรอง

3.3.2.9 ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.3.2.10 จุกปิดแก้ว (Glass stopper)

3.3.2.11 ปากคีบ (Forceps pointed end)

พหุ ม. บ. จ. ช. เว

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมถ่านกระดุกไก่และเป็ด

- นำกระดุกไก่และเป็ดที่ได้ไปต้มทำให้สุก และเนื้อออกจากกระดุกให้หมดหรือทำให้เหลือเนื้อน้อยที่สุดแล้วนำกระดุกที่ผ่านการต้มและเลาะแล้วไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนักก่อนเผา
- นำไปเผาด้วยเตาเผาไร้อากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Pyrolysis with Afterburning Process) ขนาดเตาเผามีเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) ประมาณ 60 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 2.5 เมตร
- เผาโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง (โดยจะเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มการเผา) โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 1 นาที่ ต่อ 10 องศาเซลเซียส
- หลังเผาครบ 1 ชั่วโมง รอให้อุณหภูมิเย็นลง (Cool down) จนอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถเปิดเตาเผาได้ หากอุณหภูมิยังสูงอยู่จะไม่สามารถเปิดเตาเผาได้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในเตาเผาที่สูงอยู่ไปเจอกับออกซิเจนในอากาศจะทำให้เกิดไฟลุกขึ้นมาอีกรอบได้ เปิดเตาเผาแล้วจะได้ถ่านชาร์จากกระดุกไก่และเป็ด นำมาชั่งน้ำหนักหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เสร็จแล้ว
- นำถ่านชาร์จากกระดุกไก่และเป็ดที่ได้จากการเผามาแช่และล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดคราบเขม่าถ่านหรือเศษถ่าน หลังจากนั้นผึ่งให้แห้งจากนั้นนำเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อป้องกันการทดลองขั้นตอนต่อไป

3.4.2 แผนการทดลองสำหรับเตาเผาไร้อากาศเผาไหม้สมบูรณ์

ตาราง 5 แผนการทดลอง

ชีวมวล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
กระดุกไก่	300	1
	400	1
	500	1
กระดุกเป็ด	300	1
	400	1
	500	1

3.5 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์หรือไบโอชาร์ (Biochar)

3.5.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX) ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ : ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วแต่ลักษณะที่รองรับด้วย (มีขนาดเล็กจะดีกว่า เนื่องจากตัวอย่างจะสามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนลงกรวดได้ดีกว่าป้องกันการ (Charging effects) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน



ภาพประกอบ 9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX)
ที่มา : ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

3.5.1.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) สารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช) ปริมาณผงตัวอย่างที่เหมาะสมประมาณ 1-2 กรัม (หากตัวอย่างมีน้อย สามารถอัดบนแผ่นวางตัวอย่างแบบ zero background ได้) และอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีต้องมีการ

จัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (random orientation) หากตัวอย่างเป็นก้อน ต้องตัดและขัดหน้าตัวอย่างให้เรียบ ขนาดก้อนตัวอย่างประมาณ 10×10 เซนติเมตร การเตรียมตัวอย่าง ที่มีผลมากต่อผลการวิเคราะห์เช่น หากบดตัวอย่างละเอียดเกินไปจะทำลายโครงสร้างผลึกหรือหากใช้แรงอัดตัวอย่างมากเกินไปจะทำให้เกิด Preferred Orientation ขึ้นได้



ภาพประกอบ 10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5.1.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียมดังนี้

1. บดตัวอย่างให้มีความละเอียด
2. ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ในโกร่งบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้น ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ 15,000 กิโลกรัม/ตร.ซม. 1-2 นาที
4. ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์มีลักษณะเป็นวงกลมใส และตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR ได้เลย

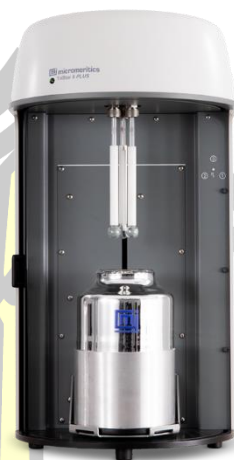
5. การทำความสะอาดแม่พิมพ์ใช้ขั้นตอนดังกล่าวสแตนเลส ชูตัวอย่างออกมา เช็ดด้วยกระดาษทิชชูและล้างด้วยอะซิโตนแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง



ภาพประกอบ 11 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ที่มา : สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

3.5.1.4 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 BETเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ประมาณ 0.3-0.5 กรัมสถานะของแข็ง เช่น อนุภาคผง เม็ด แผ่นฟิล์ม เป็นต้น ต้องไม่ฟุ้งกระจายมากและไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันหากเป็นตัวอย่างอัดเม็ด จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และต้องทำการ อบตัวอย่างมาก่อน



ภาพประกอบ 12 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET)

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

3.6 ความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเตรียมในสารละลายกรดที่มีค่า pH ไม่เกิน 2 ของถ่านชาร์จากกระดุกไก่และเป็ด หาได้จากการเปรียบเทียบปริมาณทองแดงก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านชาร์จากกระดุกไก่และเป็ด 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)

3.7 วิธีการทดลอง

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

3.7.1 การเตรียมสารละลายทองแดงสังเคราะห์

- เตรียมสารละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรทเข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทเก็บไว้ในขวดเก็บสารเคมี

3.7.2 การทดลองหาปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ดปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำในขวดรูปชมพู่ที่มีความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 2000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำไซริงค์ดูดสารขึ้นมารองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters เบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทที่ผ่านการกรองแล้วใส่ลงในขวดใส่ปิฉา
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1 และบันทึกผล

3.7.3 การทดลองหาความเข้มข้นโลหะหนักทองแดงที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ดปริมาณ 2 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เติมน้ำในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยค่าความเข้มข้น 20 ใช้ สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 1 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 99 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 40 ใช้สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 2 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 98 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 60 ใช้สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 3 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 97 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 90 ใช้คอปเปอร์ซีเตรท 4.5 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 95.5 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 120 ใช้สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 6 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 94 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 150 ใช้สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 7.5 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 92.5 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 200 ใช้สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 10 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร ค่าความเข้มข้น 250 ใช้สารละลายคอปเปอร์ซีเตรท 12.5 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 87.5 มิลลิลิตร สามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (3.2)$$

- ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำโซริงค์ดูดสารขึ้นมารองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters เบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทที่ผ่านการกรองแล้วใส่ลงในขวดใสปิดฝา
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1 และบันทึกผล

3.7.4 การทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมกับการดูดซับ

- ทำการชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ด ปริมาณ 2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL เติมสารละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรทเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้คอปเปอร์ซีเตรท 5 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 95 มิลลิลิตร
- ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม ทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที
- นำโซริงค์ดูดสารขึ้นมารองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters เบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทที่ผ่านการกรองแล้วใส่ลงในขวดใสปิดฝา
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1 และบันทึกผล

3.7.5 การทดลองค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ

- เตรียมสารละลายมาตรฐานสารละลายกรดคอปเปอร์ซีเตรทเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL
- ปรับค่า pH ให้อยู่ที่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 โดยใช้เครื่อง pH Meter
- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ด ปริมาณ 2 กรัม เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 mL ที่เตรียมไว้
- ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำโซริงค์ดูดสารขึ้นมารองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters เบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำสารละลายคอปเปอร์ซีเตรทที่ผ่านการกรองแล้วใส่ลงในขวดใสปิดฝา
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1 และบันทึกผล

Pzc วิธีการปรับค่า pH ด้วยการผสมสารละลายกรด เบส และน้ำกลั่น ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร กวนน้ำด้วยเครื่อง Magnetic stirrer แล้วใช้เครื่องวัด pH Meter กำหนดค่า pH ที่ต้องการใช้คือ 2 , 4 , 6 , 8 , 10 , 12 เมื่อได้ค่าตามที่กำหนดแล้ว นำถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกเป็ดและกระดูกไก่ ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปริมาณ 2 กรัม จากนั้นนำน้ำที่มีค่า pH ตามกำหนด เทลงในขวดรูปชมพู่ พักทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น วัดค่า pH ด้วยเครื่องวัด pH meter แล้วบันทึกค่าหลังผ่านการดูดซับ นำไปพล็อตกราฟ Pzc ค่า pH ก่อนดูดซับและหลังดูดซับ โดยให้แกน X เป็นค่า pH ก่อนดูดซับ แกน Y เป็นค่า pH หลังดูดซับ เพื่อหาจุดที่ ค่า pH เปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด

3.7.6 การทดลองอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

- ชั่งถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ดปริมาณ 2 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ที่มีการปรับความเข้มข้นของทองแดงสังเคราะห์ 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม
- ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง Water Bath
- ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำไซริงค์ดูดสารขึ้นมารองผ่านกระดาศกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters เบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับ
- นำสารละลายคอปเปอร์ไซเตรทที่ผ่านการกรองแล้วใส่ลงในขวดใสปิดฝา
- นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสงด้วย UV-spectrophotometer
- นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้สมการที่ 3.1 และบันทึกผล

3.8 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

นำผลที่ได้จากการทดลองหาความเข้มข้นโลหะหนักทองแดงที่เหมาะสมต่อการดูดซับไปหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่คำนวณหาความสามารถในการดูดซับต่อเวลา และศึกษากลไกการดูดซับด้วยสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm), ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm), Harkins-Jura isotherm, Jovanovic isotherm, และไอโซเทอมแบบเทมคิน (Temkin isotherm)

3.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการนำผลจากการทดลอง ระยะเวลาการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ มาทำการทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ โดยใช้ผลการทดลองจาก ข้อ 3.5.4 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 เพื่อหาค่าคงที่ในการแบบจำลอง อัตราการดูดซับโดย 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

3.10 เทอร์โมไดนามิก(Thermodynamic)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจาก ข้อ 3.5.6 มาใช้ในการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ΔG° ได้จากสมการที่ (3.3)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L \quad (3.3)$$

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 $1/T$ ดังแสดงในสมการที่ (3.4)

$$\ln K_L = \frac{(\Delta S^\circ)}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (3.4)$$

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)

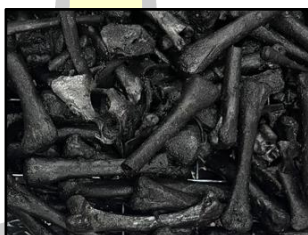


บทที่ 4

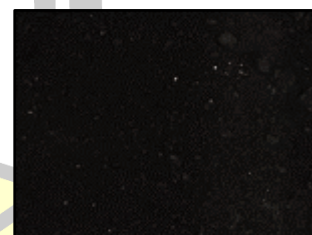
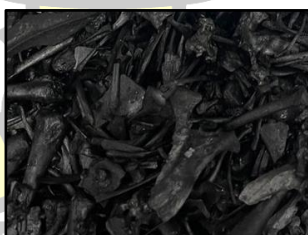
ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะทางกายภาพของกระดูกไก่และเป็ดก่อนและหลังกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า

กระดูกไก่และกระดูกเป็ดมีลักษณะเป็นสีขาวค่อนข้างโปร่งใส แข็งแรงและน้ำหนักเบา เนื่องจากเป็นกระดูกที่มีลักษณะกลวง (Pneumatic bone) ภายในมีโพรงอากาศ หลังจากผ่านกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้าผ่านกระดูกที่ได้มีลักษณะเปราะมีความแข็งแรงน้อยกว่ากระดูกก่อนการเผาผ่านกระดูกจะมีสีดำหรือสีน้ำตาลเข้มเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันระหว่างไฟโรไลซิส การไหม้เกรียมของกระดูกส่งผลให้มีสีเข้มและเป็นต่อตะโก พื้นผิวสัมผัสพื้นผิวมีเนื้อละเอียด มีเศษผงสีดำจากติดอยู่บริเวณผ่านกระดูก บดเป็นผงได้ง่ายขึ้นขึ้นอยู่กับความประณีตของการบด



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 13 ลักษณะทางกายภาพของกระดูกไก่และกระดูกเป็ด

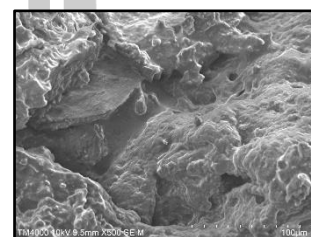
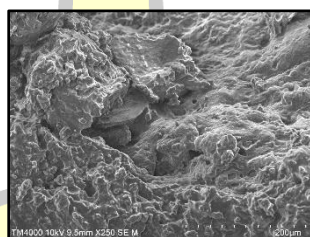
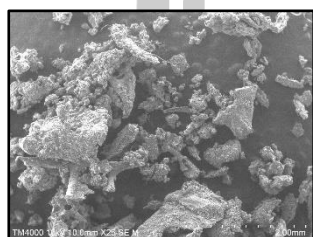
(ก) กระดูกไก่ตากแห้ง, ถ่านชาร์จากกระดูกไก่หลังกระบวนการเผาและผงถ่านชาร์จากกระดูกไก่
(ข) กระดูกเป็ดตากแห้ง, ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดหลังกระบวนการการเผาและผงถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

4.2 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกระดุกไก่และกระดุกเป็ด

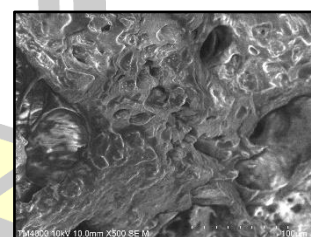
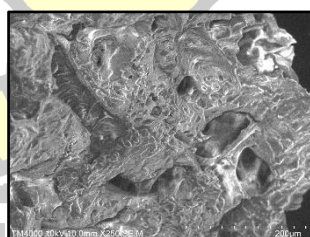
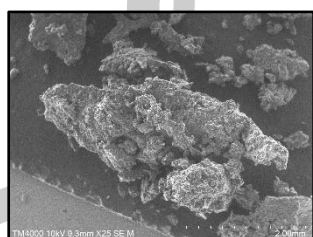
4.2.1 SEM – EDX

ปัจจุบันการใช้เครื่อง SEM สามารถส่องขยายวัตถุเป็นหลายหมื่นเท่าทำให้สามารถดูรูปร่างคุณลักษณะทางกายภาพของสิ่งที่ตาเปล่ามองไม่เห็นและยังสามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในวัตถุได้ในคราวเดียวกัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ให้ความแน่นอนในการตรวจพิสูจน์สูง สำหรับการส่องขยายถ่านชาร์จากกระดุกไก่และกระดุกเป็ด ที่มีลักษณะเป็นผงผลึกละเอียด

ผลการศึกษาการส่องขยายกระดุกไก่และกระดุกเป็ดบดละเอียดก่อนเข้ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่กำลังขยาย 25x 250x 500x พบว่ากระดุกมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอมากและมีพื้นผิวที่แตกต่างกันตั้งแต่พื้นผิวหยาบไปจนถึงพื้นผิวเรียบ พื้นผิวของตัวอย่างมีความขรุขระที่รูปทรงเรขาคณิตไม่สามารถกำหนดได้



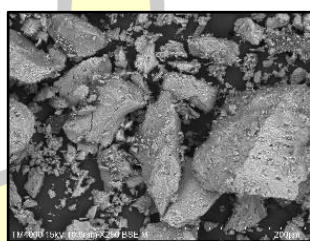
(ก)



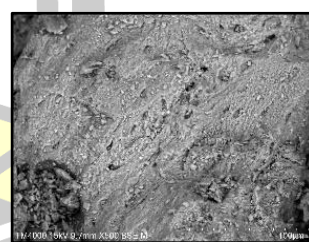
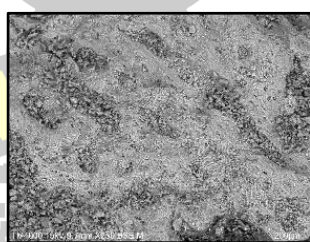
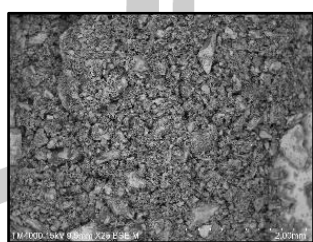
(ข)

ภาพประกอบ 14 SEM – EDX (ก) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่ก่อนการเผาที่กำลังขยาย 25x 250x 500x และ (ข) ภาพการส่องขยายกระดุกเป็ดก่อนเผาที่กำลังขยาย 25x 250x 500x

ผลการศึกษาการส่องขยายถ่านชาร์จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ดบดละเอียดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่ อุณหภูมิ 300 °C 400 °C 500 °C ไม่พบความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างกระดูกที่ถูกเผาในอุณหภูมิที่ต่างกัน ถ่านชาร์หลังจากผ่านการบดละเอียดแล้วมีลักษณะเป็นผลึก สีดำมันวาว ภาพประกอบ 15 (ก) (ข) (ค) และภาพประกอบ 16 (ก) (ข) (ค) แสดงให้เห็นว่าหลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้วถ่านกระดูกมีความพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ตั้งแต่อุณหภูมิสัมผัสที่ 300 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสัมผัสที่ 400 °C ที่อุณหภูมิ 500 °C พื้นผิวเริ่มปรากฏเป็นเม็ดละเอียดมากขึ้น และสัณฐานวิทยาในตัวอย่างถ่านกระดูกทั้งหมดมีความคล้ายคลึงกันมาก ถ่านกระดูกที่อุณหภูมิ 500 °C พื้นผิวของถ่านกระดูกมีรูพรุนมากกว่าถ่านกระดูกที่อุณหภูมิอื่นๆ ซึ่งพื้นผิวของถ่านที่อุณหภูมิอื่นมีลักษณะที่หนาแน่นกว่าอาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเผาพริกในสถานะของแข็ง ส่งผลให้ขนาดผลึกและการเติบโตของเกรนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างถ่านกระดูกมีความหนาแน่นขึ้น (Ellingham, Thompson et al., 2018)



(ก)

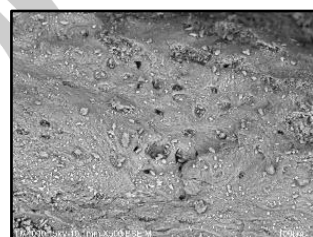
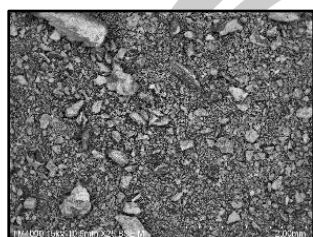


(ข)

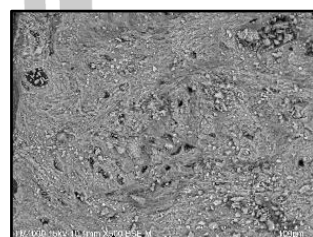
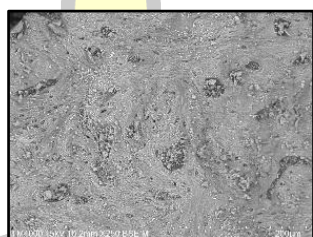
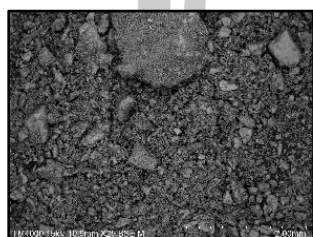


(ค)

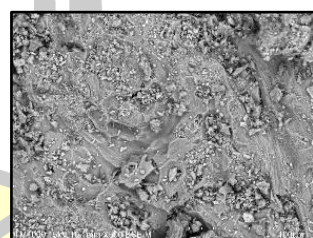
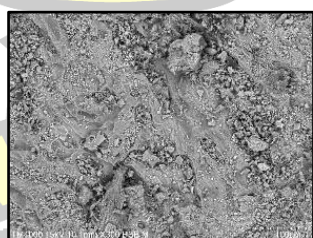
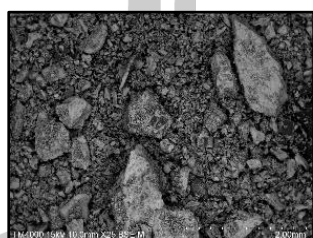
ภาพประกอบ 15 SEM – EDX (ก) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C
กำลังขยาย 25x 250x 500x (ข) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C
กำลังขยาย 25x 250x 500x และ (ค) ภาพการส่องขยายกระดุกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C
กำลังขยาย 25x 250x 500x



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 16 SEM EDX (ก) ภาพการส่องขยายกระดุกเป็ดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C
กำลังขยาย 25x 250x 500x (ข) ภาพการส่องขยายกระดุกเป็ดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C
กำลังขยาย 25x 250x 500x และ (ค) ภาพการส่องขยายกระดุกเป็ดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C
กำลังขยาย 25x 250x 500x

จากตารางประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักดังแสดงในตาราง 6 กระดูกไก่มีปริมาณคาร์บอน Ca 43.33 % และตาราง 7 กระดูกเป็ดมีปริมาณธาตุ Ca 38.83 %

ตาราง 6 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในกระดูกไก่

Spectrum	C (%)	O (%)	Ca (%)	Etc. (%)
Test Chicken Bone	35.18	21.20	43.33	0.29

ตาราง 7 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในกระดูกเป็ด

Spectrum	C (%)	O (%)	Ca (%)	Etc. (%)
Test Chicken Bone	32.54	26.11	38.83	2.52

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิด ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence analyzer) พบว่า บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวของธาตุที่เหมือนกัน โดยบนพื้นผิวของถ่านกระดูกไก่และกระดูกเป็ดนั้นพบว่าส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน (O) ธาตุแคลเซียม (Ca) และธาตุคาร์บอน (C) ดังแสดง ในตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยซึ่งระบุองค์ประกอบหลักของตัวอย่างถ่านกระดูกที่อุณหภูมิต่างกันในน้ำหนัก % มีองค์ประกอบอินทรีย์ที่สำคัญคือแคลเซียม (Ca) (Patel, Han et al., 2015)

ตาราง 8 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในถ่านกระดูกไก่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

Spectrum	C (%)	O (%)	Ca (%)	Etc. (%)
Test Chicken 300 °C	31.38	38.25	19.83	10.54
Test Chicken 400 °C	17.61	38.87	29.26	14.26
Test Chicken 500 °C	19.63	33.50	30.86	16.01

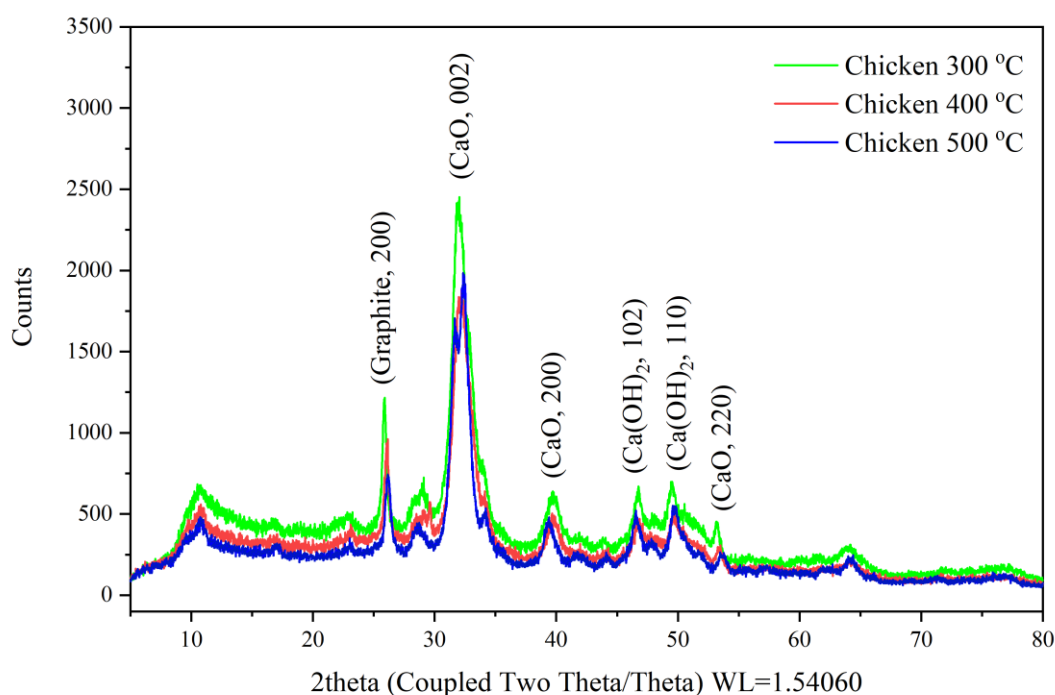
ตาราง 9 ปริมาณและประเภทของธาตุต่างๆในถ่านกระดุกเปิดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C
400 °C และ 500 °C

Spectrum	C (%)	O (%)	Ca (%)	Etc. (%)
Test Duck 300 °C	26.58	38.45	25.04	9.93
Test Duck 400 °C	21.83	33.75	29.99	14.43
Test Duck 500 °C	20.83	31.00	29.08	19.09

4.2.3 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD

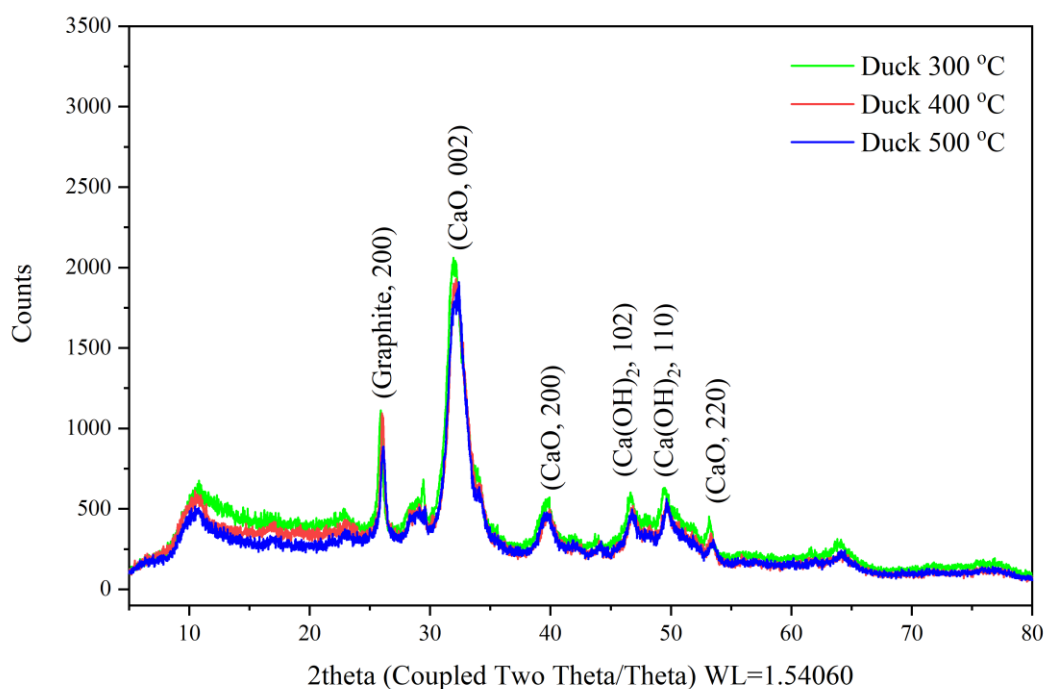
XRD ของถ่านกระดุกไก่และกระดุกเปิดที่อุณหภูมิต่างกันโดยมีความแปรผันของเวลาที่อยู่อากาศ รูปแบบ XRD เผยให้เห็นว่าคริสตัลโครงสร้างเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ในทุกตัวอย่าง กล่าวกันว่าความเป็นผลึกเป็นหน่วยวัดขนาดผลึก จากรูปแบบ XRD สังเกต พบถ่านกระดุกประกอบด้วยเฟสผลึกอาจเกิดจากการมีอยู่ของสารอินทรีย์สารต่างๆ ดังนั้นจึงไม่มีการแยกฟิสิกที่มองเห็นได้ความกว้างของจุดสูงสุดที่ลดลงและความสูงจุดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอย่างมากสามารถสังเกตได้จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Patel, Han et al., 2015) ภาพประกอบ 17 และภาพประกอบ 18 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD ของถ่านกระดุกไก่และถ่านกระดุกเปิดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในเชิงโครงสร้างแคลเซียมฟอสเฟตอยู่ในรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เศษคาร์บอนกระจายไปทั่วโครงสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้งหมด แต่คาร์บอนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางที่มีฤทธิ์สูงที่ปกคลุมพื้นผิวไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีรูพรุน (Rezaee, 2011)

ผลการวิเคราะห์ XRD ที่ได้จากกระดุกไก่ เผาที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงในภาพประกอบ 17 จากรูปที่เห็นได้ว่า CaO เกิดขึ้นจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สิ่งนี้ระบุได้จากการมีฟิสิกของการเลี้ยวเบน 2θ ที่ 32.26° , 39.66° , 53.88° และ 53.31° รูปแบบการเลี้ยวเบนของ CaO เป็นไปตามมาตรฐานของ JCPDS การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มี Graphite อยู่ที่ 2θ ของ 25.80° ในทางกลับกัน ฟิสิกบางส่วน of Ca(OH)_2 ก็ปรากฏ 2θ ที่ 46.73° , 49.51° การก่อตัวของ Ca(OH)_2 เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับ H_2O ในอากาศ (Linggawati, 2016)



ภาพประกอบ 17 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD ของถ่านกระดูกไก่ที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C 500 °C

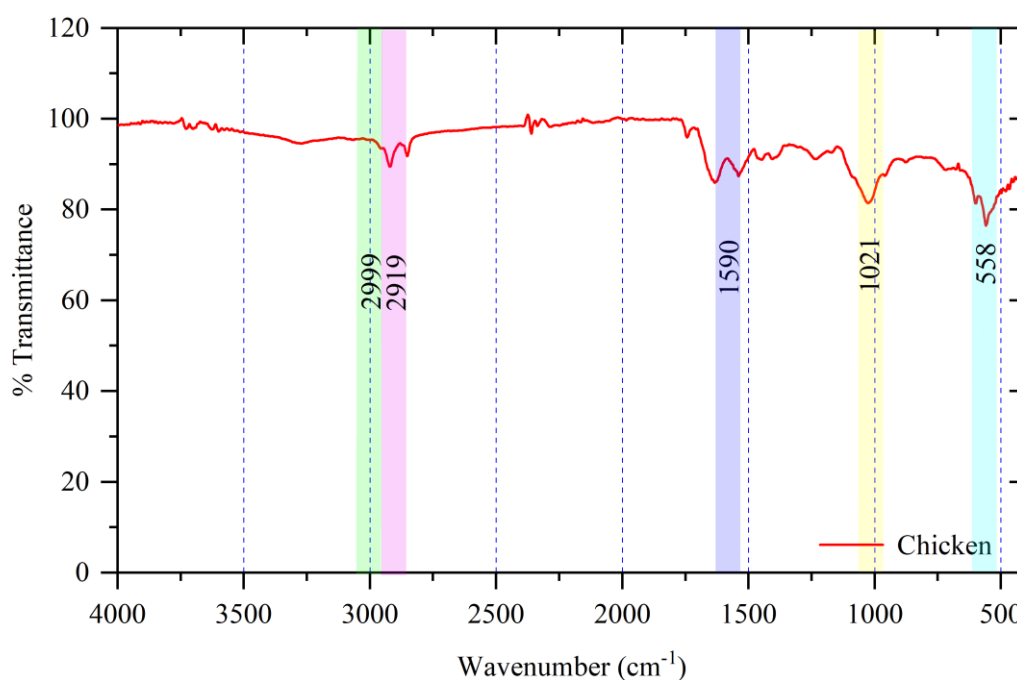
ผลการวิเคราะห์ XRD ที่ได้จากกระดูกเปิด เผาที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงในภาพประกอบ 18 จากรูปที่เห็นได้ว่า CaO เกิดขึ้นจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สิ่งนี้ระบุได้จากการมีพีคของการเลี้ยวเบน 2θ ที่ 31.90°, 39.62°, 53.88° และ 53.29° รูปแบบการเลี้ยวเบนของ CaO เป็นไปตามมาตรฐานของ JCPDS (Chen, 2006) การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 300 °C 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มี Graphite อยู่ที่ 2θ ของ 25.90° และพบพีคบางส่วนของ Ca(OH)₂ ก็ปรากฏ 2θ ที่ 46.57° และ 49.49° รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาจากกระดูกไก่และกระดูกเปิดที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ยังคงแสดงพีค CaO มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ XRD ของการศึกษานี้



ภาพประกอบ 18 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD ของถ่านกระดูกเปิดที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C 500 °C

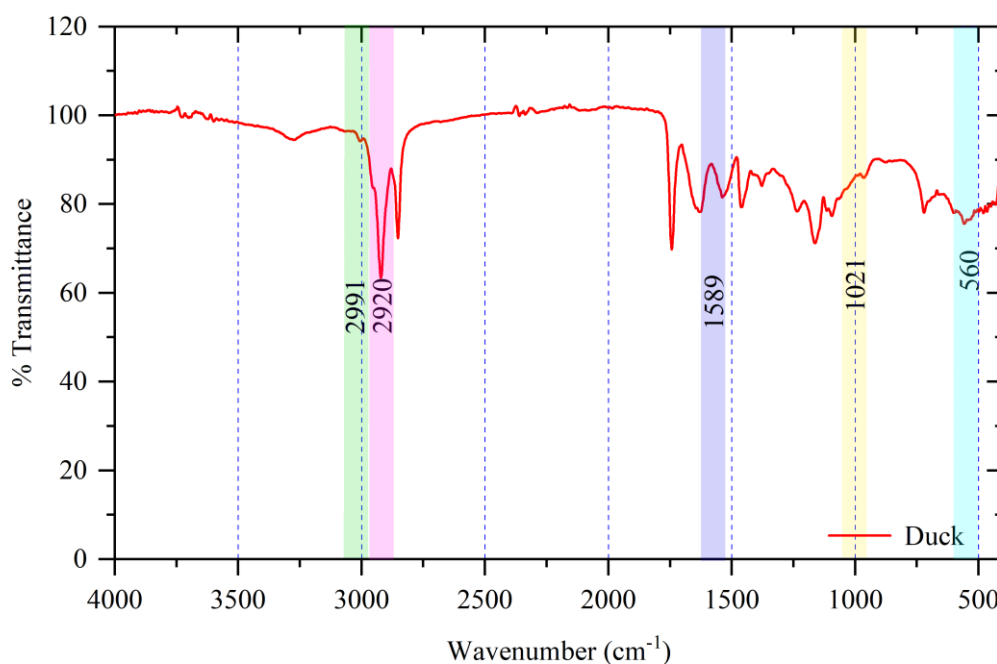
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ถ่านกระดูกด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR)

ภาพประกอบ 19 แสดงผลการศึกษา FT-IR สเปกตรัมของกระดูกไก่ก่อนการเผา พบว่า บริเวณ sharp peak ที่ตำแหน่ง $1,021\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลรูปแบบของ (C—C) การยืดการสั่นสะเทือนของ CO_2 sharp peak ที่ตำแหน่ง 558 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลรูปแบบของ (C—Cl) stretching halo compound การยืดการสั่นสะเทือนที่มีฮาโลเจน (halogen) เชื่อมต่อกับโครงสร้างนั้นและ sharp peak ที่ตำแหน่ง $1,590\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลรูปแบบของ (C=C) stretching cyclic alkene การยืดการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นอัลเคนที่มีโครงสร้างวงรีและมีการผูกคู่คาร์บอนเพียงตัวเดียวที่อาจมีผลต่อลักษณะการทำงานของโครงสร้างนั้น พบตำแหน่งที่ถูกดูดซับปรากฏที่ค่าเพียงเล็กน้อยที่ $2,999\text{ cm}^{-1}$ และ $2,919\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลรูปแบบของ (C—H) stretching alkynes การยืดการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของอัลไคน์ (alkyne) ที่เป็นอัลเคนที่มีการผูกคู่โครงสร้างคาร์บอนแบบเทียบเคียง



ภาพประกอบ 19 FTIR สเปกตรัมของกระดูกไก่ก่อนการเผา

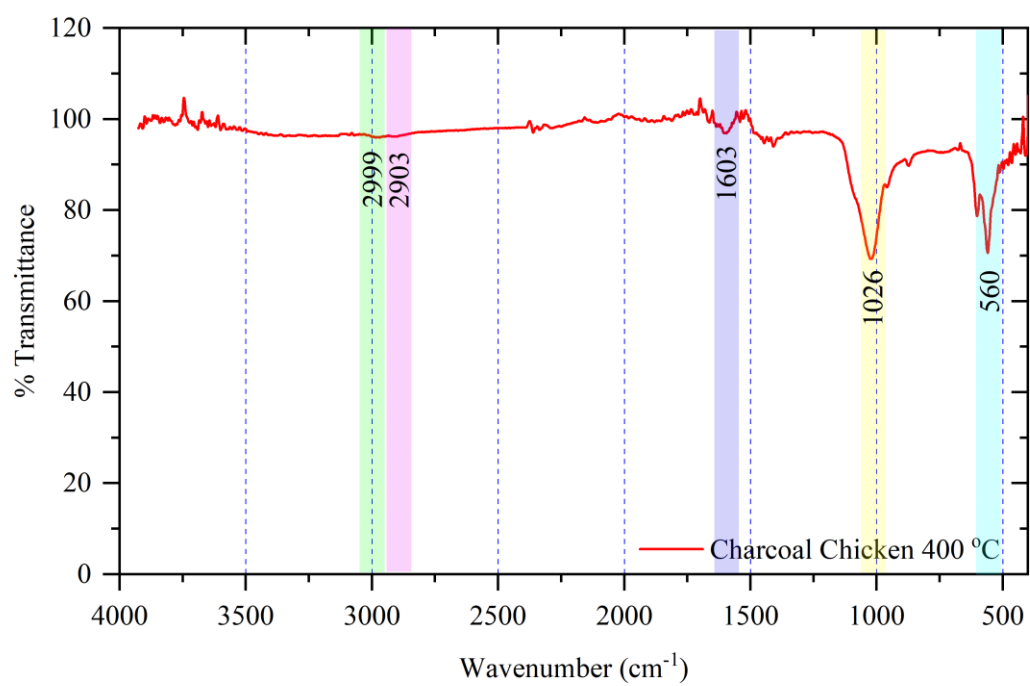
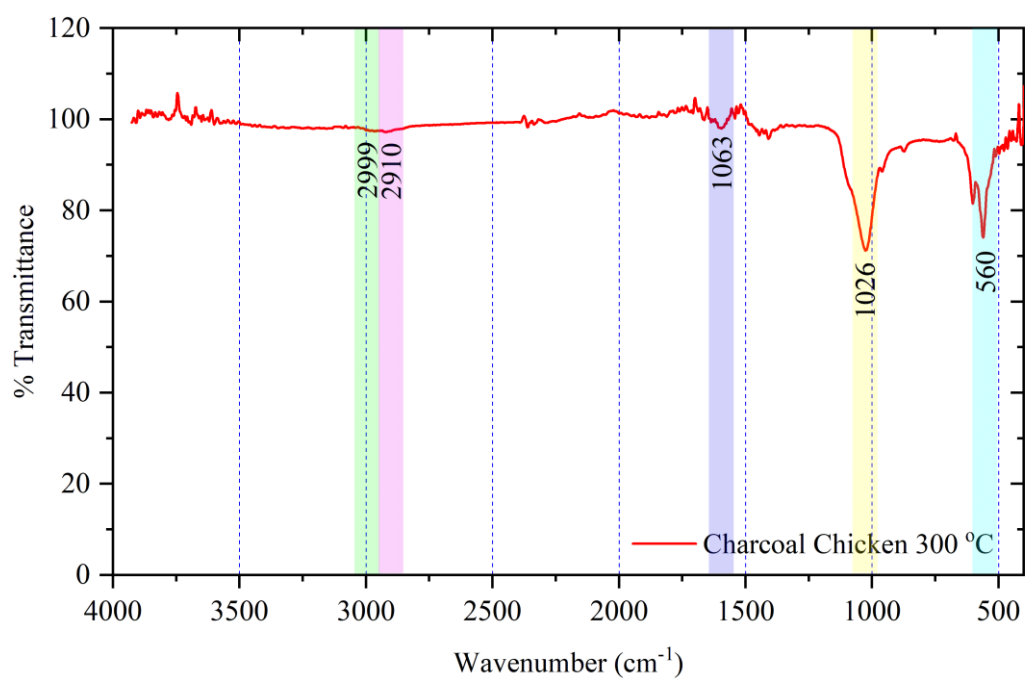
ภาพประกอบ 20 แสดงผลการศึกษา FT-IR สเปกตรัมของกระดูกเปิดก่อนการเผา พบว่า บริเวณ sharp peak ที่ตำแหน่ง $2,920\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—H) stretching alkynes การยืดการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของอัลไคน์ (alkyne) sharp peak ที่ตำแหน่ง $1,589\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C=C) stretching cyclic alkene การยืดการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นอัลเคนที่มีโครงสร้างวงรีและมีการผูกคู่คาร์บอนเพียงที่อาจมีผลต่อลักษณะการทำงานของโครงสร้าง และ sharp peak ที่ตำแหน่ง 560 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—Cl) stretching halo compound การยืดการสั่นสะเทือนที่มีฮาโลเจน (halogen) เชื่อมต่อกับโครงสร้างนั้น พบตำแหน่งที่ถูกดูดซับปรากฏพิคเพียงเล็กน้อยที่ $2,991\text{ cm}^{-1}$ และ $1,021\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—H) stretching alkynes และ หมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—C) ตามลำดับ



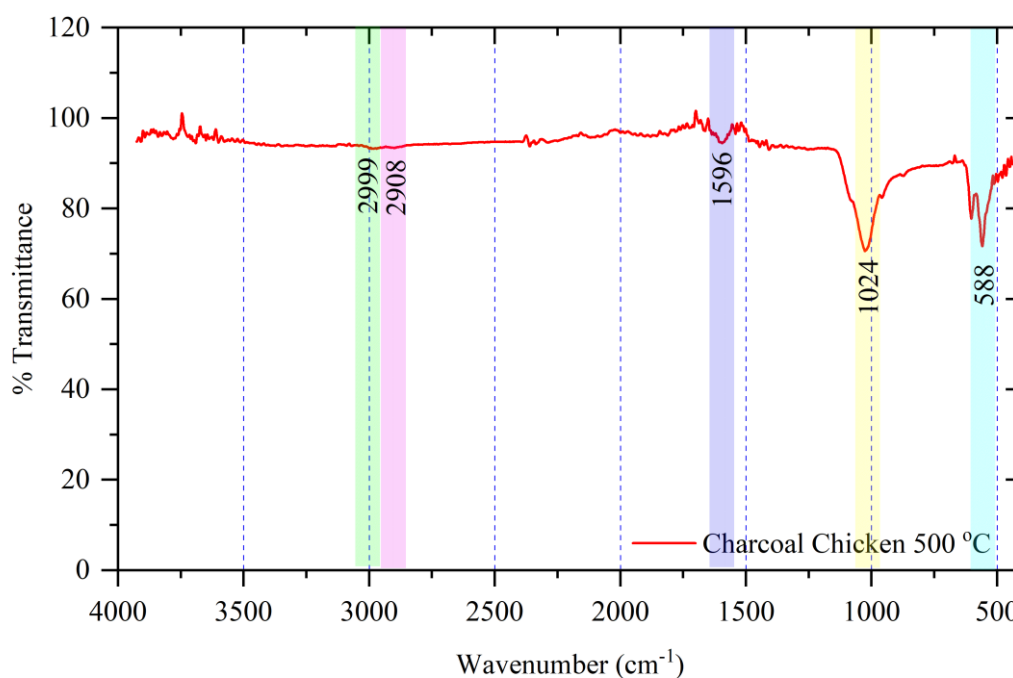
ภาพประกอบ 20 FTIR สเปกตรัมของกระดูกเปิดก่อนการเผา

ผลการศึกษากระดูกไก่ที่ผ่านการเผาแล้วในอุณหภูมิที่แตกต่างกันพบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิมีผลไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในภาพประกอบ 21 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) ที่บริเวณ $2,500-3,500\text{ cm}^{-1}$ (O—H stretching) หายไป และปรากฏ sharp peak ที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่ง $1,026\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—C) การยึดการสันสะท้อนของ CO_2 และ 560 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—Cl) stretching halo compound การยึดการสันสะท้อนที่มีฮาโลเจน (halogen) เชื่อมต่อกับโครงสร้าง และปรากฏพีคเพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่ง $1,063\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลกรุปของ C—N stretching amine

พูน ปณ จิต ชีเว



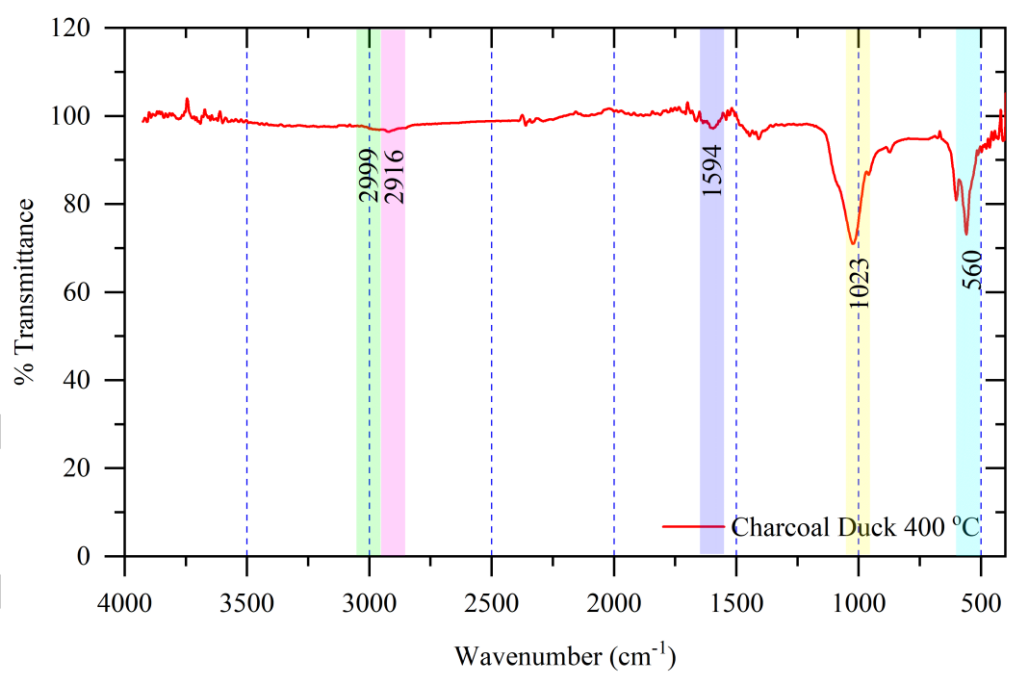
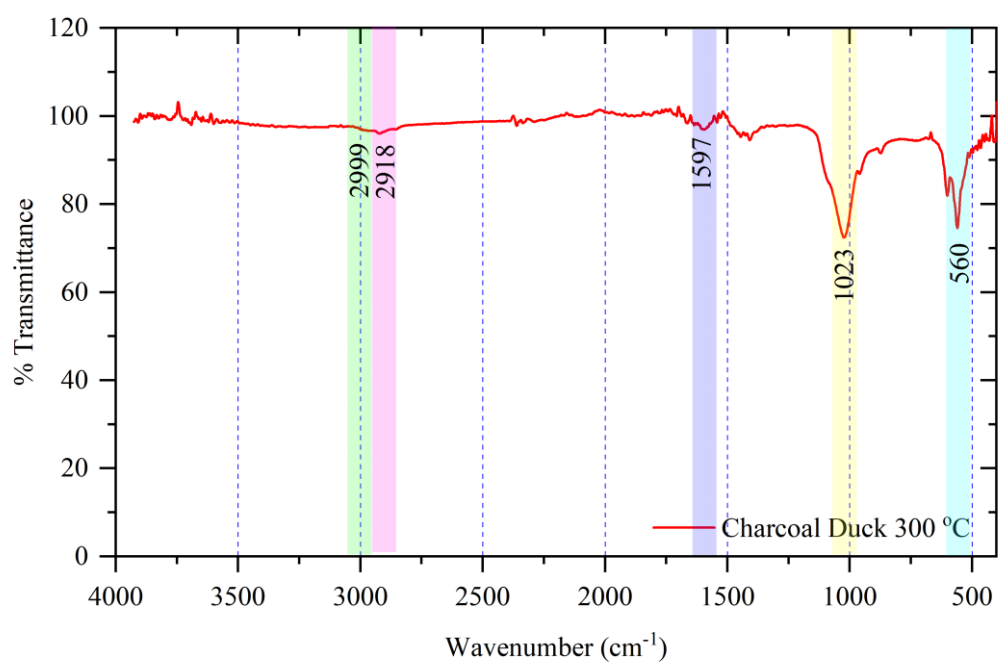
(9)

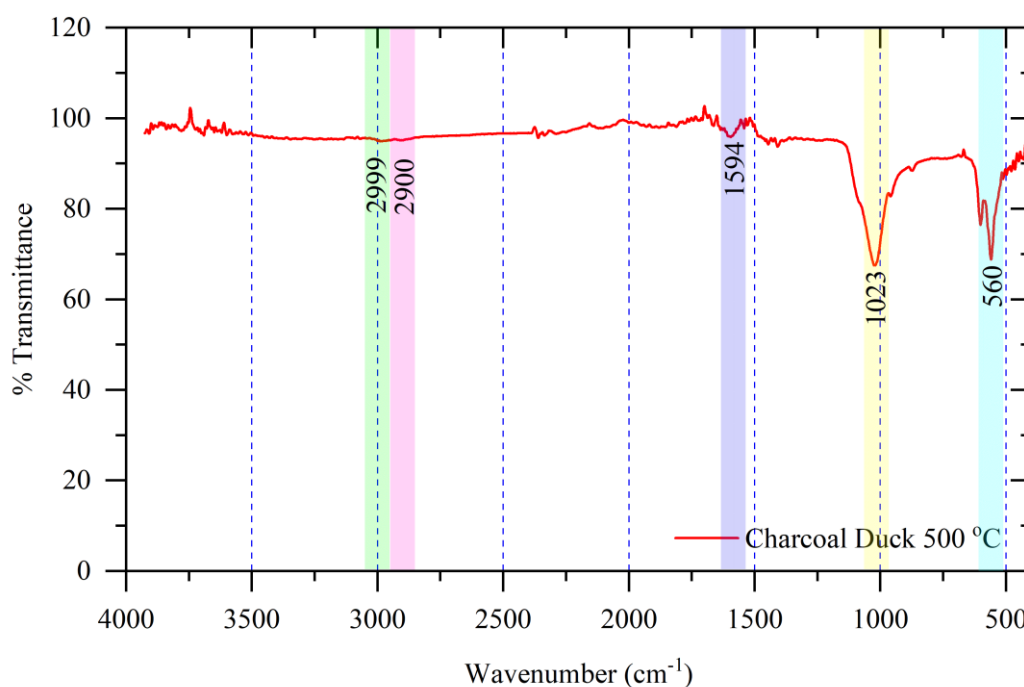


(ค)

ภาพประกอบ 21 FTIR สเปกตรัมของถ่านชาร์จากกระดูกไก่ (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 500°C

ผลการศึกษากระดูกเปิดที่ผ่านการเผาแล้วในอุณหภูมิที่แตกต่างกันพบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิมีผลไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในภาพประกอบ 22 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) ที่บริเวณ 2,500-3,500 cm^{-1} (O—H stretching) หายไป และปรากฏ sharp peak ที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่ง ที่ 1,023 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—C) การยึดการสันสะเทือนของ CO_2 และ 560 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C—Cl) stretching halo compound การยึดการสันสะเทือนที่มีฮาโลเจน (halogen) เชื่อมต่อกับโครงสร้าง และปรากฏพีคเพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 1,594 cm^{-1} ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลกรุปของ C—N stretching amine





(ค)

ภาพประกอบ 22 FTIR สเปกตรัมของถ่านชาร์จากกระดุกเปิด (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด
อุณหภูมิ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิดอุณหภูมิ 400 °C
(ค) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิดอุณหภูมิ 500 °C

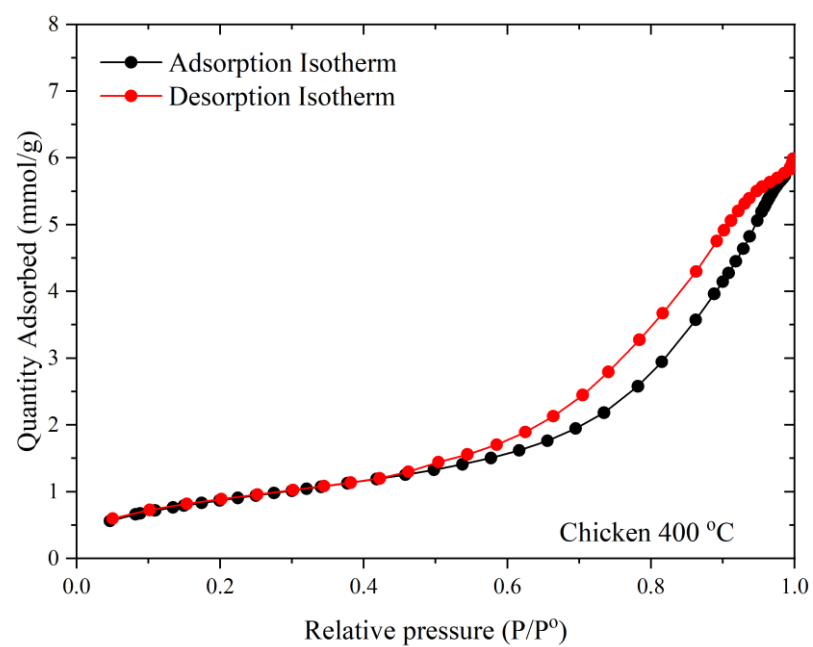
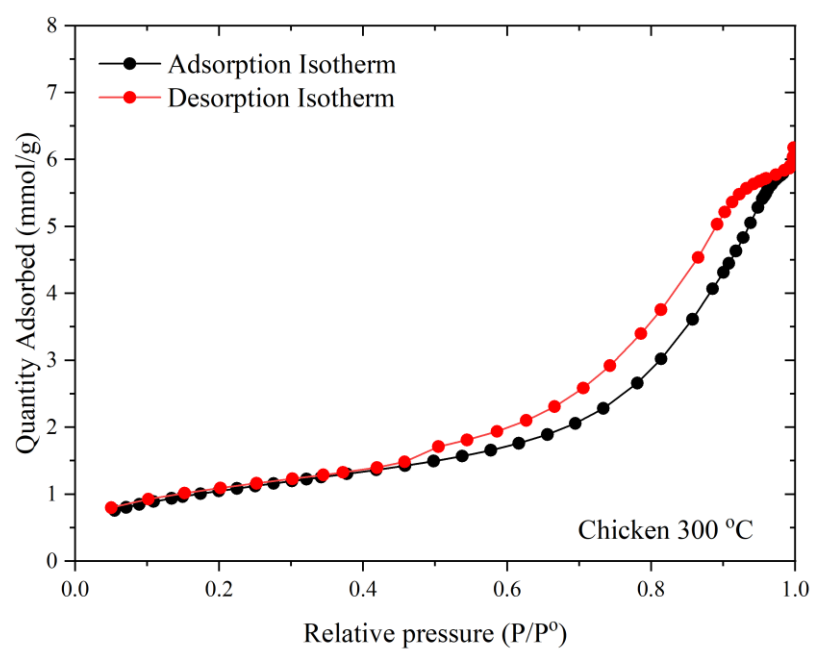
สรุปได้ว่าตัวอย่างที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันออร์แกนิก (Organic Functional Group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ด้วยคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นโปร่งในการดูดซับ โดยเฉพาะมีกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) หมู่ฟังก์ชันนี้พบในแอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักอย่างดี กลุ่มแอมีน (-NH₂) หมู่ฟังก์ชันนี้พบในอะมีนและอะมิโน และกลุ่มการบริสุทธิไฮดรอกซี (-COOH) หมู่ฟังก์ชันนี้พบในอะมีนและอะมิโนและมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยเฉพาะโลหะที่มีปริมาณน้อยและมักมีลักษณะทางเคมีที่มักถูกตรวจจับได้ด้วย FTIR การใช้หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ร่วมกับการดูดซับและเทคนิค FTIR จะช่วยในการวิเคราะห์และตรวจสอบปริมาณของโลหะหนักในสารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ ทำให้เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและความปลอดภัยของสารเคมีในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสารเคมี และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง รวมถึงการใช้งานในการวิจัยและพัฒนาสารเคมีใหม่ด้วย

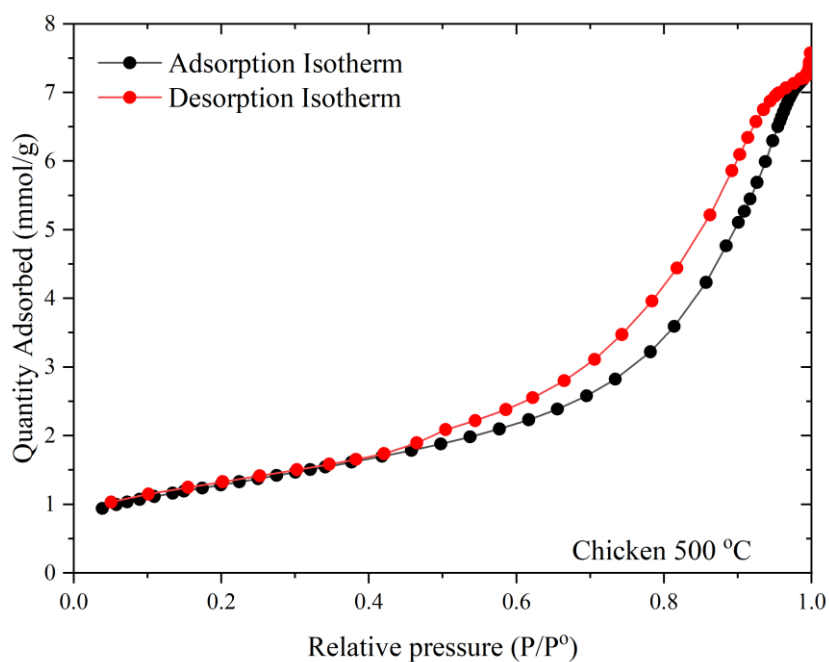
4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับและการคายการดูดซึมของไนโตรเจน

ในการอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ แบบจุนเนียร์-ลันก์-เฮิร์มฮอลท์ (Langmuir–Freundlich isotherm) ซึ่งระบุว่าปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (adsorbed) เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในแก๊สหรือของเหลวและความคล้ายคลึงที่มีกับสารนี้ในส่วนผิวที่ถูกดูดซับและการสลับตำแหน่งระหว่างอุปกรณ์ในแก๊สหรือของเหลว โดยมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายแนวโน้มของความเข้มข้นในการดูดซับในการแสดงอยู่ในรูปแบบที่ง่ายด้วยฟังก์ชันการดูดซับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดีในเชิงปริมาณ และมีความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้กับความเข้มข้นของสารในแก๊สหรือของเหลวและความคล้ายคลึงในส่วนผิวที่ถูกดูดซับ และการสลับตำแหน่งระหว่างอุปกรณ์ในแก๊สหรือของเหลว อีกทั้งยังเป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำนายที่เหมาะสมของอุปกรณ์ในการทำนายสมรรถนะในงานดูดซับและการสลับตำแหน่งในอุตสาหกรรมชีวภาพและอุตสาหกรรมเคมี

ผลการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ BET โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในภาพประกอบ 23 (ก) และ (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ที่อุณหภูมิ 300 °C และ 400 °C ดูดซับได้เต็มที่ประมาณ 6 มิลลิโมล/กรัม และภาพประกอบ 23 (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ที่อุณหภูมิ 500 °C ถูกดูดซับจนหมด ความสามารถในการดูดซับก๊าซเต็มที่คือประมาณ 7.5 มิลลิโมล/กรัม ถ่านชาร์จากกระดูกไก่มีลักษณะเป็นไอโซเทอร์ม Type III จากการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิด Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกแก้ว ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง



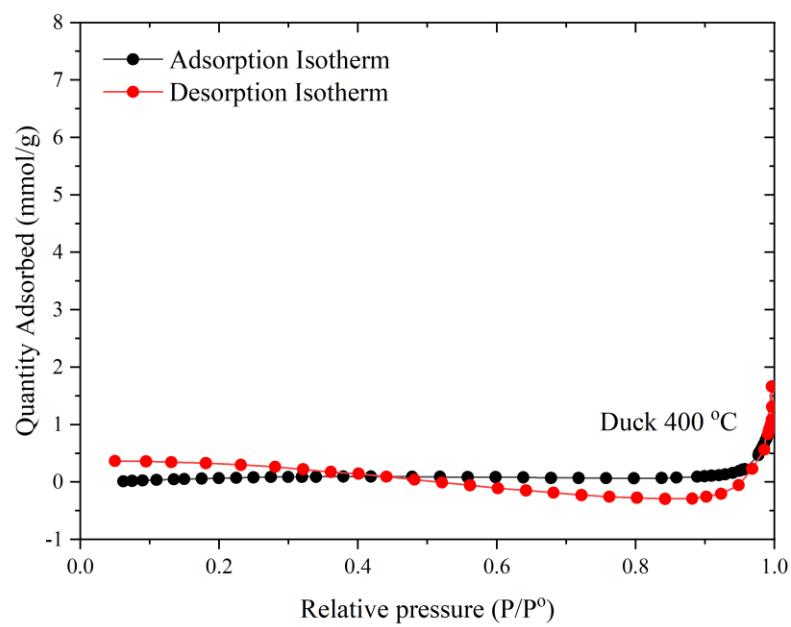
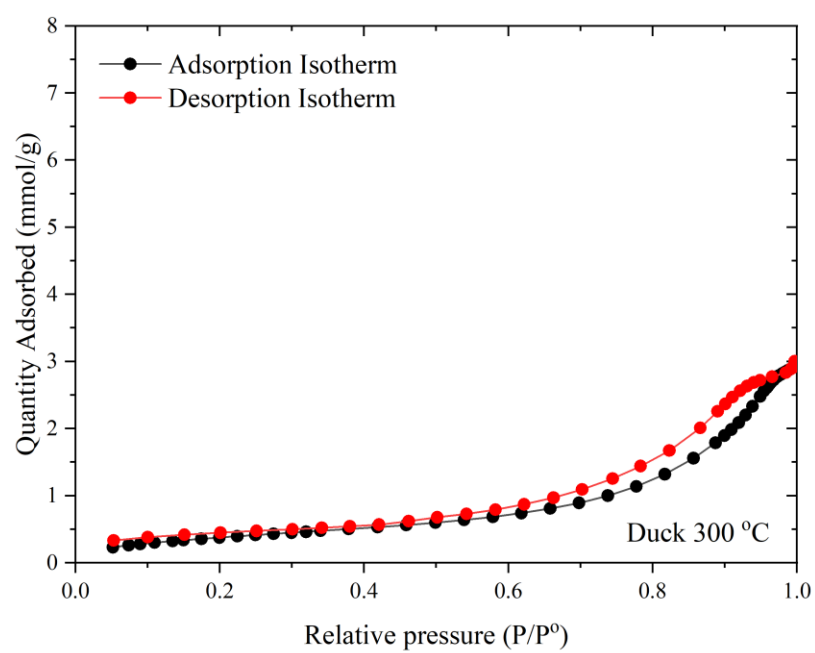


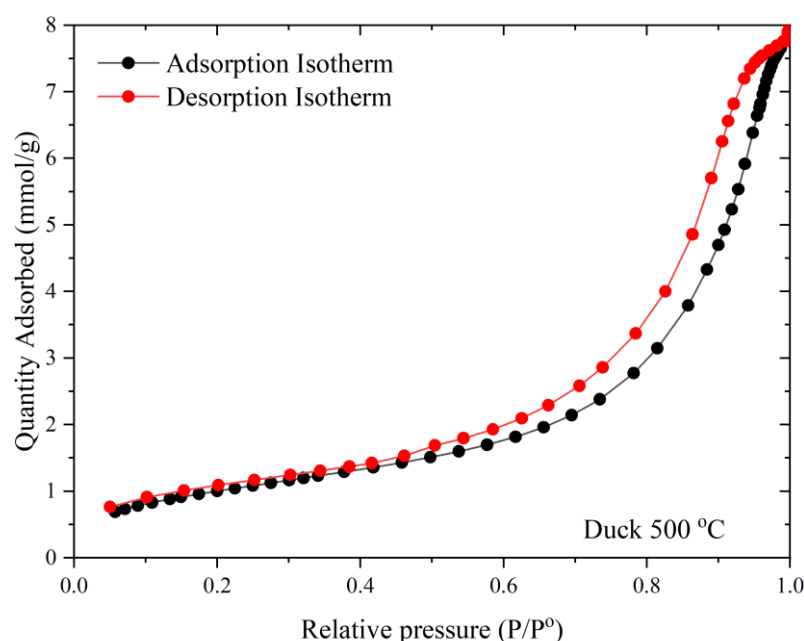


(ค)

ภาพประกอบ 23 ไอโซเทอร์มของการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 500 °C

ผลการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ BET โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในภาพประกอบ 24 (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดที่อุณหภูมิ 300 °C ถูกดูดซับจนเต็มที่มีประมาณ 3 มิลลิโมล/กรัม ภาพประกอบ 24 (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดที่อุณหภูมิ 400 °C ถูกดูดซับได้เต็มที่มีประมาณ 1.6 มิลลิโมล/กรัม และภาพประกอบ 24 (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดที่อุณหภูมิ 500 °C ถูกดูดซับจนหมด ความสามารถในการดูดซับก๊าซเต็มอยู่ที่ประมาณ 8 มิลลิโมล/กรัม ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดมีลักษณะเป็นไอโซเทอร์ม Type III จากการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิด Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ ซึ่งมีผลการการจำแนกไอโซเทอร์ม เช่นเดียวกันกับถ่านชาร์จากกระดูกไก่





(จ)

ภาพประกอบ 24 ไอโซเทอร์มของการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิ 500 °C

4.2.6 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET)

จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเผาส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกระดูกไก่ เมื่อเปรียบเทียบผลของการเผาในอุณหภูมิ 300 °C เป็น 500 °C พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 85.2438 ตร.ม./กรัม เป็น 102.8218 ตร.ม./กรัม ปริมาตรทั้งหมดของโพรงเพิ่มขึ้นจาก 0.2049 ลบ.ซม./กรัม เป็น 0.2517 ลบ.ซม./กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 9.1659 นาโนเมตร เป็น 9.798 นาโนเมตร และส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกระดูกเป็ดเมื่อเปรียบเทียบผลของการเผาในอุณหภูมิ 300 °C เป็น 500 °C พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 32.9727 ตร.ม./กรัม เป็น 84.1812 ตร.ม./กรัม ปริมาตรทั้งหมดของโพรงเพิ่มขึ้นจาก 0.1011 ลบ.ซม./กรัม เป็น 0.2691 ลบ.ซม./กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 12.2708 นาโนเมตร เป็น 12.7889 นาโนเมตร ความพรุนส่วนใหญ่เป็นความพรุนเล็กน้อย ขนาดรูพรุนของถ่านไบโอชาร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ เมื่อมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก การดูดซับของโมเลกุลขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น (Carabineiro, 2009) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิใน

การเผาที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสารดูดซับ เนื่องจากความร้อนจะไปทำลายสารประกอบอินทรีย์ที่ติดอยู่บนผิวของสารดูดซับและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น (Azargohar and Dalai, 2008) จะเห็นได้ว่า ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500°C เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดที่อุณหภูมิเดียวกันคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชาร์จากกระดูกไก่อมีค่าสูงกว่าเหมาะที่จะต่อยอดการพัฒนาและปรับปรุงพื้นที่ผิวเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในการใช้งาน

ตาราง 10 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านชาร์จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ด

อุณหภูมิ	ถ่านชาร์จากกระดูกไก่			ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด		
	300°C	400°C	500°C	300°C	400°C	500°C
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)	85.243	73.468	102.821	32.972	21.349	84.181
ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (ลบ.ซม./กรัม)	0.204	0.202	0.251	0.101	0.034	0.269
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ รูพรุน (นาโนเมตร)	9.165	11.046	9.798	12.271	6.545	12.789

4.2.7 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วย CHNS

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด ตารางที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของถ่านชาร์จากกระดูกไก่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด 14.004 มีปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุด 2.041% มีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุด 2.312% มีปริมาณซัลเฟอร์สูงที่สุด 0.014% และองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด 17.384 มีปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุด 2.382% มีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุด 2.640% มีปริมาณซัลเฟอร์สูงที่สุด 0.217%

ตาราง 11 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วย CHNS

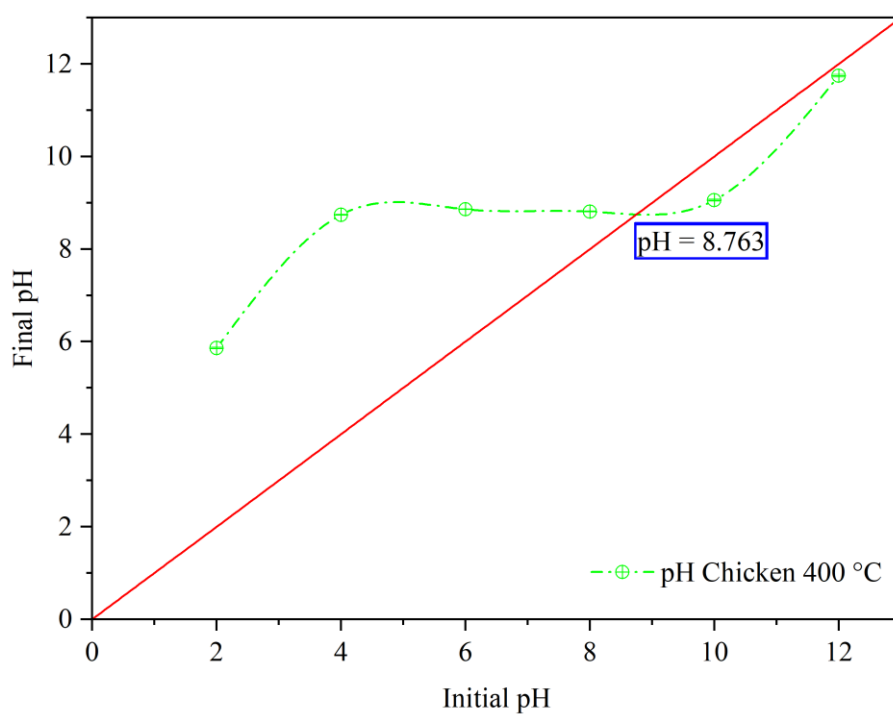
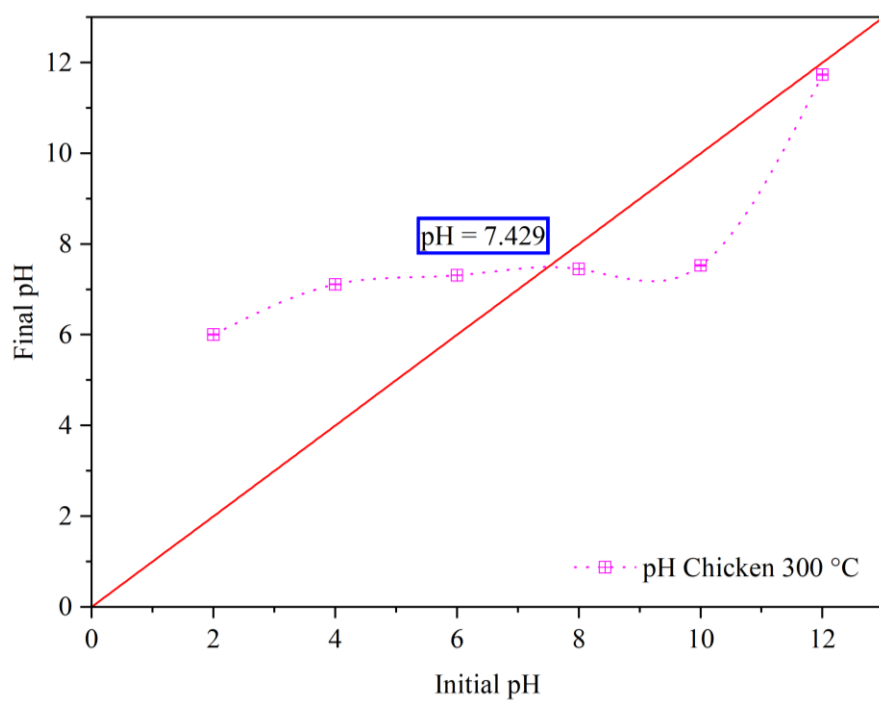
ชื่อตัวอย่าง	ผลการทดสอบ			
	Carbon (% Wt)	Hydrogen (% Wt)	Nitrogen (% Wt)	Sulfur (% Wt)
ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C	14.004	2.041	2.312	N.D.
ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C	13.712	1.642	2.202	0.007
ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C	13.683	0.868	1.348	0.014
ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 300 °C	17.384	2.382	2.640	0.177
ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 400 °C	16.507	2.332	2.489	0.217
ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 500 °C	12.953	1.287	1.740	0.101

4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

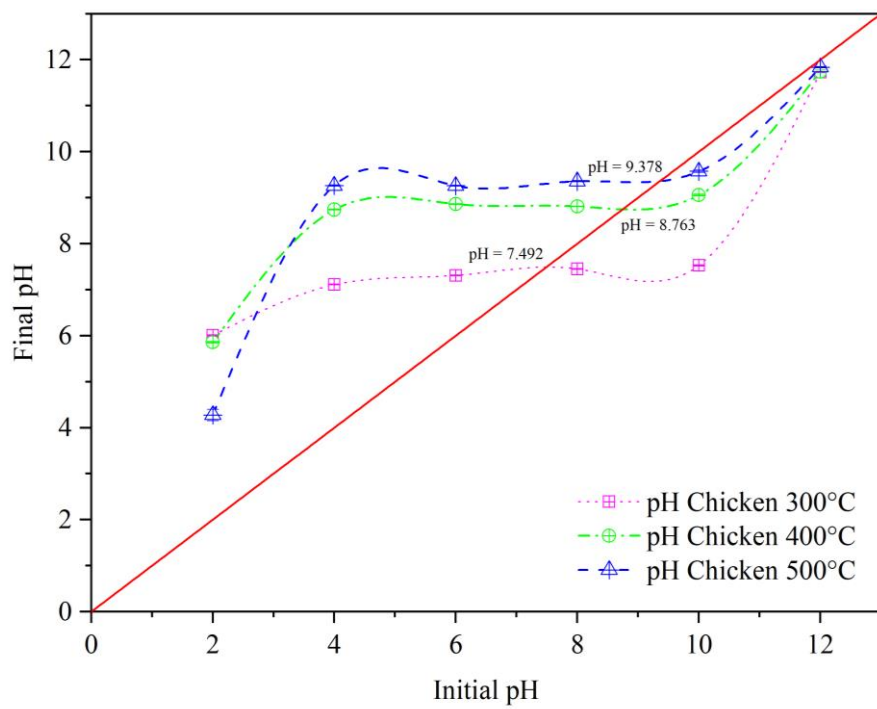
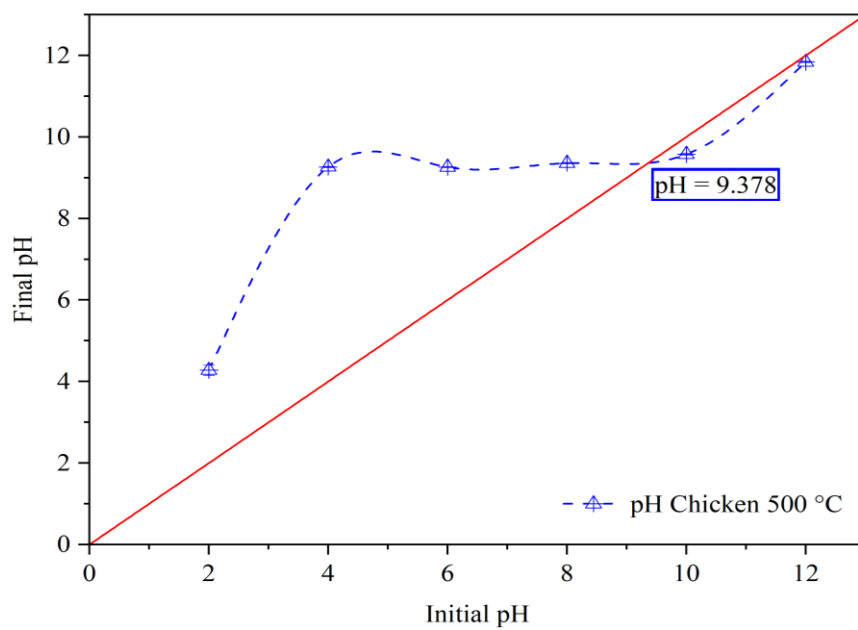
4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH

การศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับทองแดงสังเคราะห์โดยใช้ถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด การศึกษาอิทธิพลของ pH เป็นส่วนสำคัญของการศึกษาเพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่าง pH และกระบวนการต่าง ๆ ในธรรมชาติและในสิ่งมีชีวิตรวมถึงการศึกษา pH_{PZC} (pH at the Point of Zero Charge) ค่า pH ที่เกิดขึ้นเมื่อผิวของวัสดุหรือพื้นผิวของวัสดุมีประจุเป็นศูนย์ หรือเมื่อผิวมีประจุศูนย์ ในสภาวะนี้การกำหนดค่า pH จะมีผลต่อสมดุลของการประจุบนผิว ซึ่งจุดนี้มีความสำคัญในการศึกษาและเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุหรือสารต่าง ๆ ในสภาพที่ประจุศูนย์

ภาพประกอบ 25 (ก) (ข) และ (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้นของสารละลายและค่าสุดท้าย pH หลังกระบวนการดูดซับ ค่า pH สุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เริ่มต้นสูงขึ้นมากกว่า pH_{PZC} เมื่อสารละลายมี pH มากกว่า pH_{PZC} จะทำให้ผิวของวัสดุมีประจุลบ ค่า Final pH อยู่ในช่วง 7 – 9 เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นในช่วง pH 2 4 6 ภาพประกอบ 25 (ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้นของสารละลายและค่าสุดท้าย pH หลังกระบวนการดูดซับเปรียบเทียบในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ค่า PZC ของตัวดูดซับถ่านชาร์จากกระดูกไก่ที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C และ 500 °C คือ 7.429, 8.763 และ 9.378 ตามลำดับ พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุบวกเมื่อ pH ของสารละลายจะน้อยกว่า pH_{PZC} ในขณะที่พื้นผิวจะมีประจุลบเมื่อ pH ของสารละลายสูงกว่า pH_{PZC}



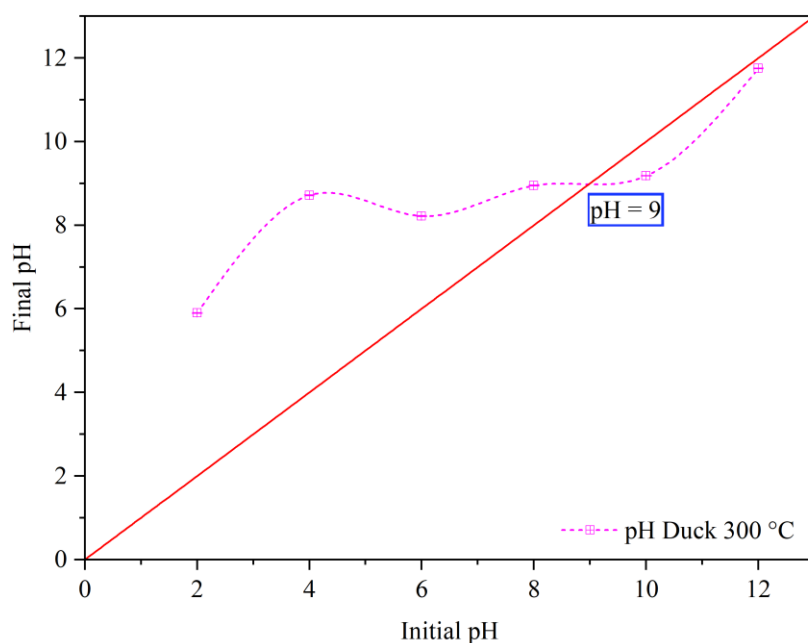
(u)



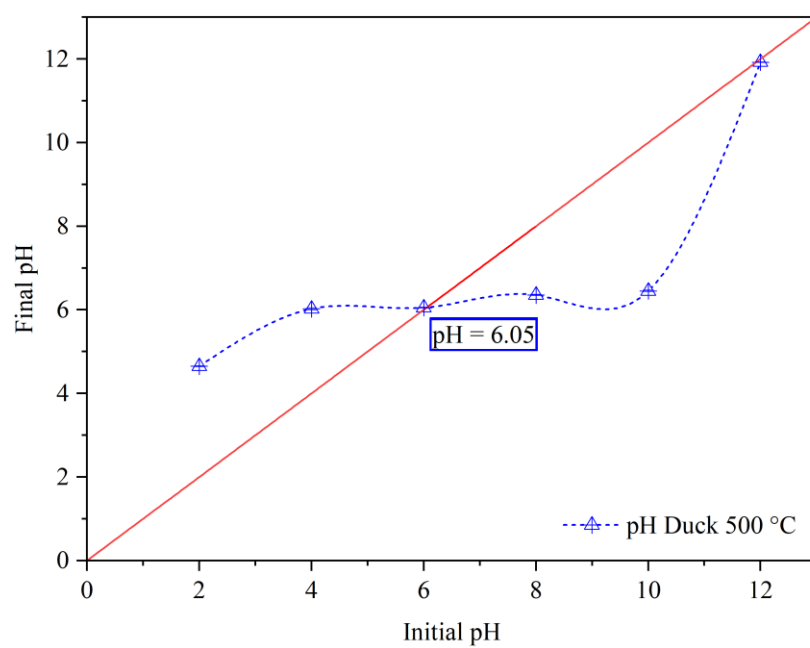
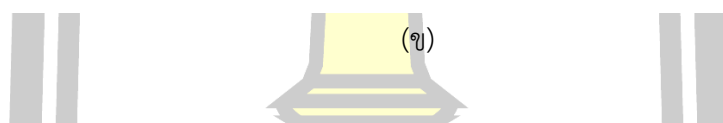
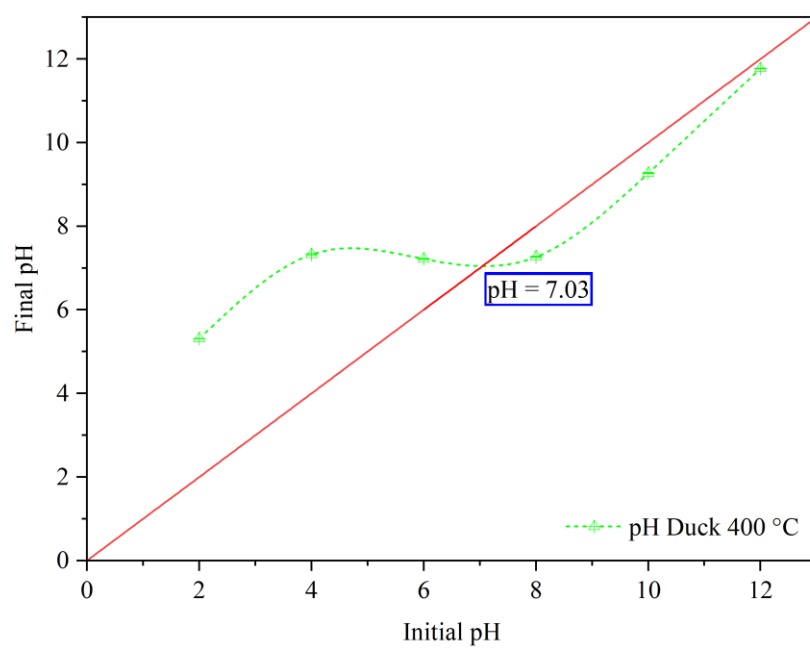
(q)

ภาพประกอบ 25 แสดง pH_{PZC} (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C และ (ง) เปรียบเทียบผล pH_{PZC} ของแต่ละอุณหภูมิ

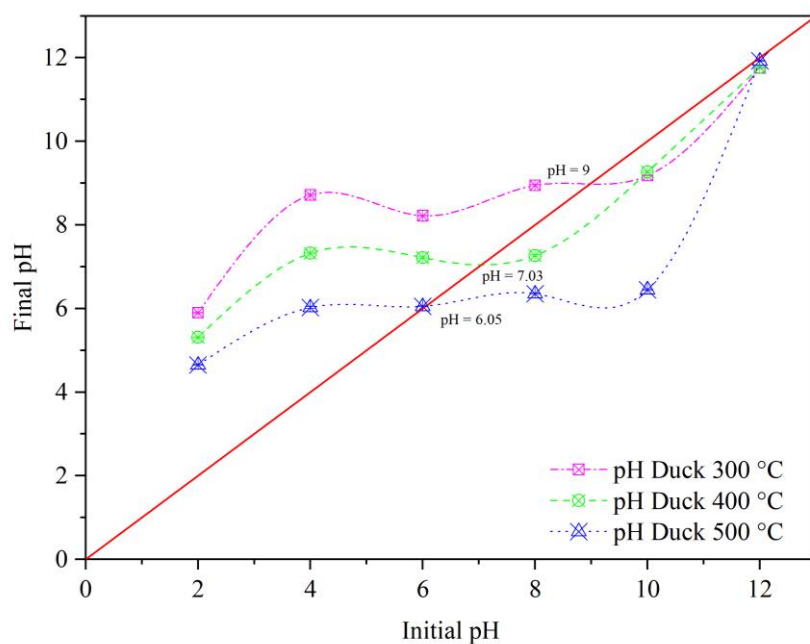
ภาพประกอบ 26 (ก) (ข) และ (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้นของสารละลายและค่าสุดท้าย pH หลังกระบวนการดูดซับ ค่า pH สุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เริ่มต้นสูงขึ้นมากกว่า pH_{PZC} เมื่อสารละลายมี pH มากกว่า pH_{PZC} ภาพประกอบ 26 (ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้นของสารละลายและค่าสุดท้าย pH หลังกระบวนการดูดซับเปรียบเทียบในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ค่า pH_{PZC} ของตัวดูดซับถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C และ 500 °C คือ 9.00, 7.03 และ 6.05 ตามลำดับ พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุบวกเมื่อ pH ของสารละลายจะน้อยกว่า pH_{PZC} ในขณะที่พื้นผิวจะมีประจุลบเมื่อ pH ของสารละลายสูงกว่า pH_{PZC}



พูน ปณ ทิโต ชีเว



(9)



(ง)

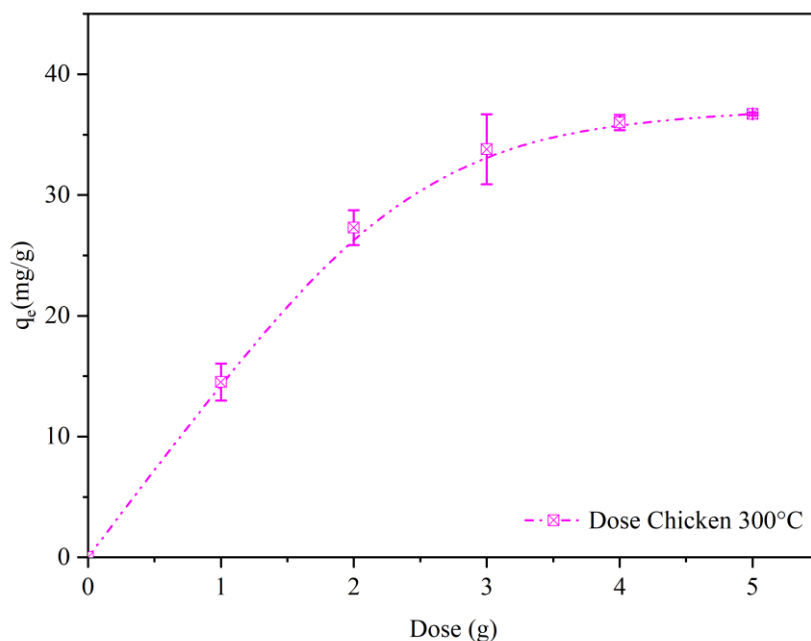
ภาพประกอบ 26 แสดง pH_{PZC} (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 500 °C และ (ง) เปรียบเทียบผล pH_{PZC} ของแต่ละอุณหภูมิ

ผลการวิเคราะห์ pH_{PZC} ของถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด พบว่าเมื่อนำค่า pH ระหว่างถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดมาเปรียบเทียบกัน pH เริ่มต้นของสารละลายและค่าสุดท้ายของ pH หลังกระบวนการดูดซับ ค่า pH ที่ถ่านกระดูกสามารถดูดซับได้ดีอยู่ในค่าที่เป็นกลางค่อนข้างเป็นเบสเล็กน้อยอยู่ที่ 6-9 ค่า pH สูงที่สุดของการดูดซับคือค่าการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 500 °C pH_{PZC} อยู่ที่ 9.978 ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิ 500 °C 0.978 ถ่านทั้งสองชนิดในแต่ละอุณหภูมิมีค่าสุดท้ายของ pH หลังกระบวนการดูดซับอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน

4.3.2 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ (Dose)

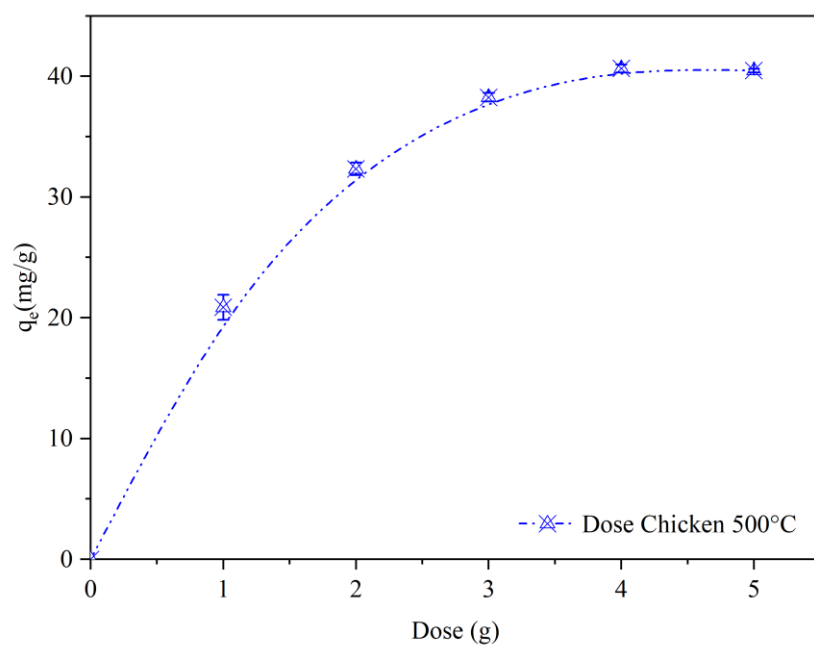
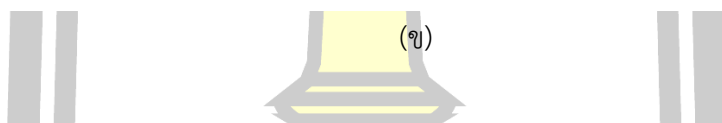
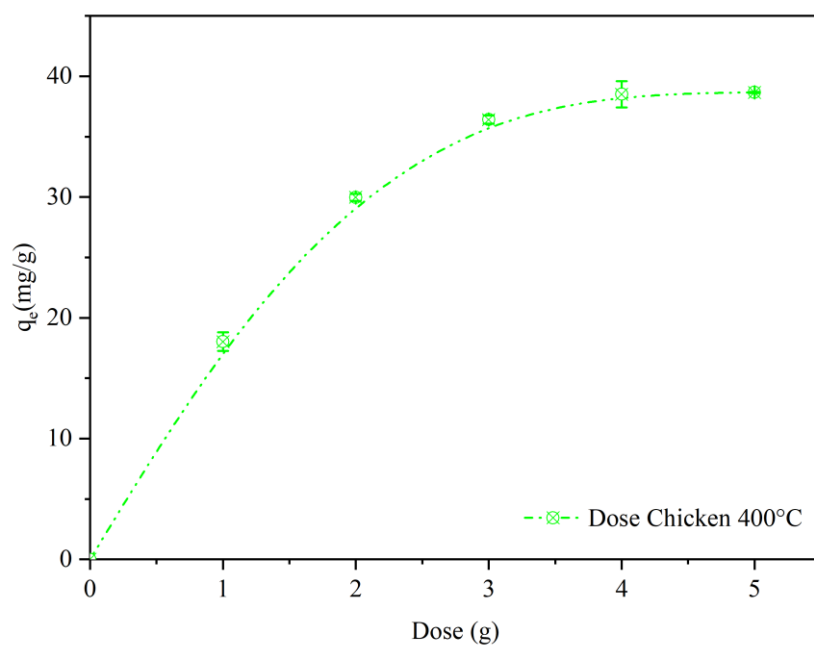
ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและการใช้งานของสารดูดซับในแต่ละกรณีการใช้งาน การเลือกใช้สารดูดซับที่มีความสามารถเหล่านี้ตรงตามความต้องการของแต่ละงานจะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการใช้งานตัวดูดซับ

ในทางอุตสาหกรรมมักจะคำนึงถึงการคุ้มทุนร่วมกับประสิทธิภาพในการดูดซับและเพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายในการลดต้นทุนในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ต้องทำการศึกษา คือ ปริมาณตัวดูดซับ ซึ่งควรที่จะใช้ปริมาณน้อยที่สุดที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผลของปริมาณตัวดูดซับและความสามารถในการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่ แสดงใน ภาพประกอบ 27 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับ 0 - 2 g ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายและตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของตัวดูดซับ และเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3 g ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

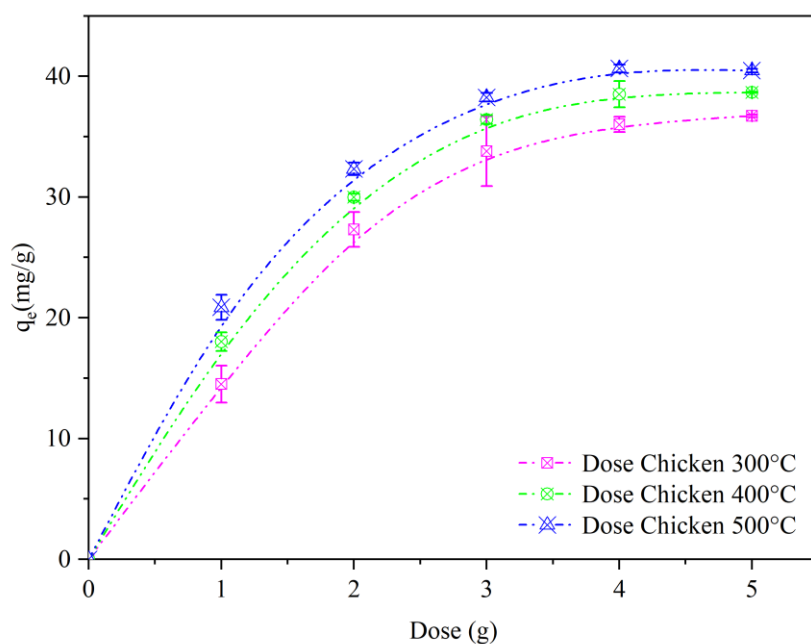


(ก)

พูน ปณ จิต ชีเว



(B)



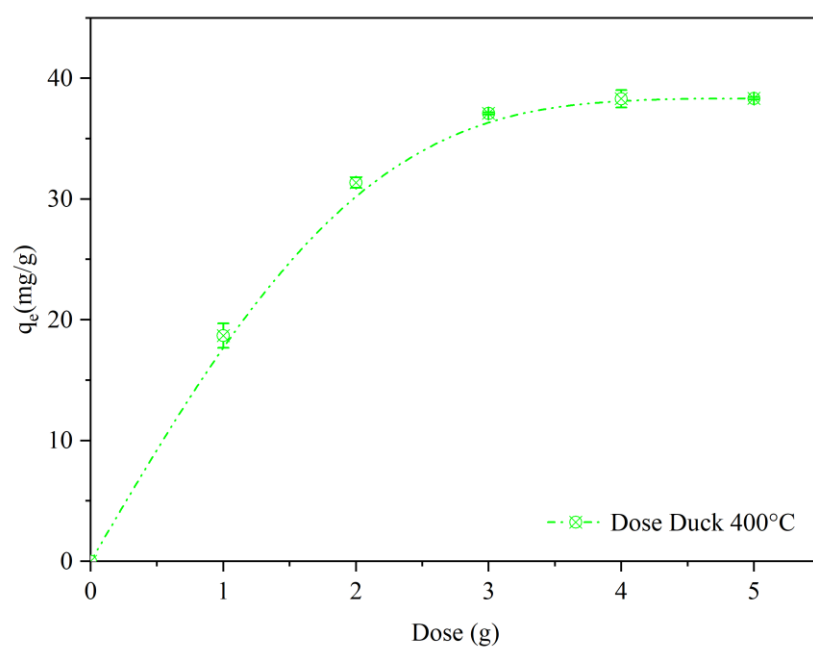
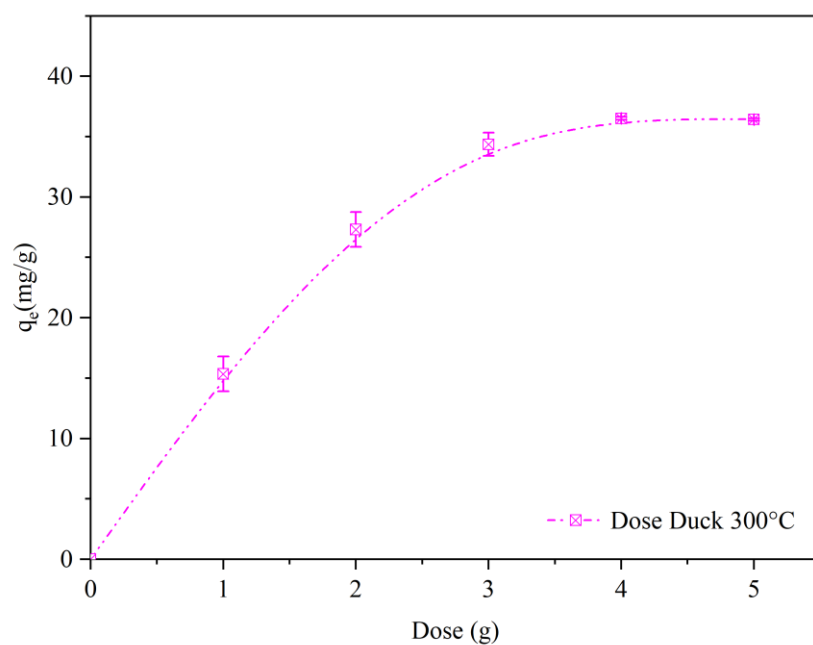
(ง)

ภาพประกอบ 27 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ
(ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จาก
กระดูกไก่ 500 °C และ (ง) ผลของการเปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับของถ่านชาร์จาก
กระดูกไก่ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

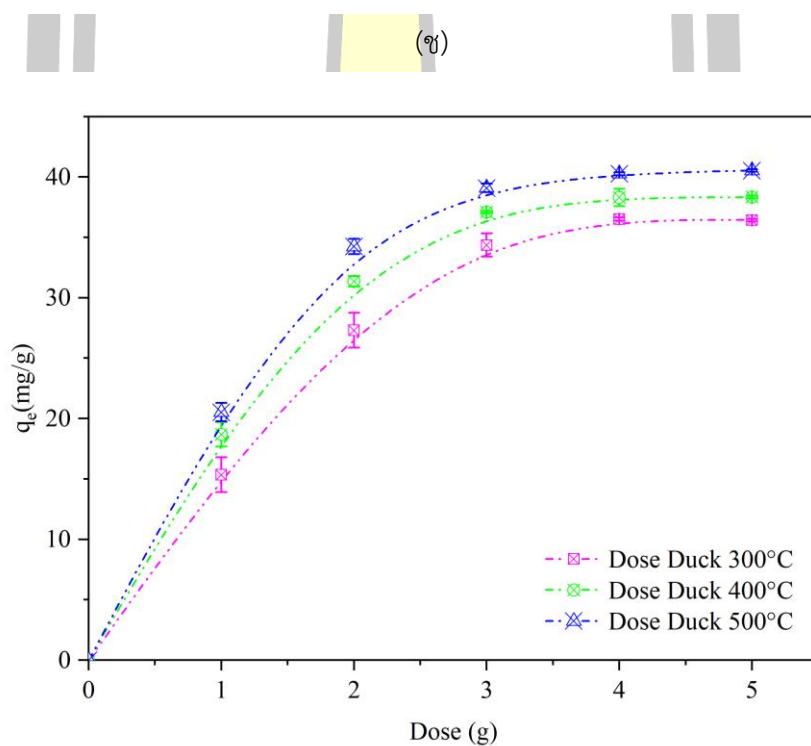
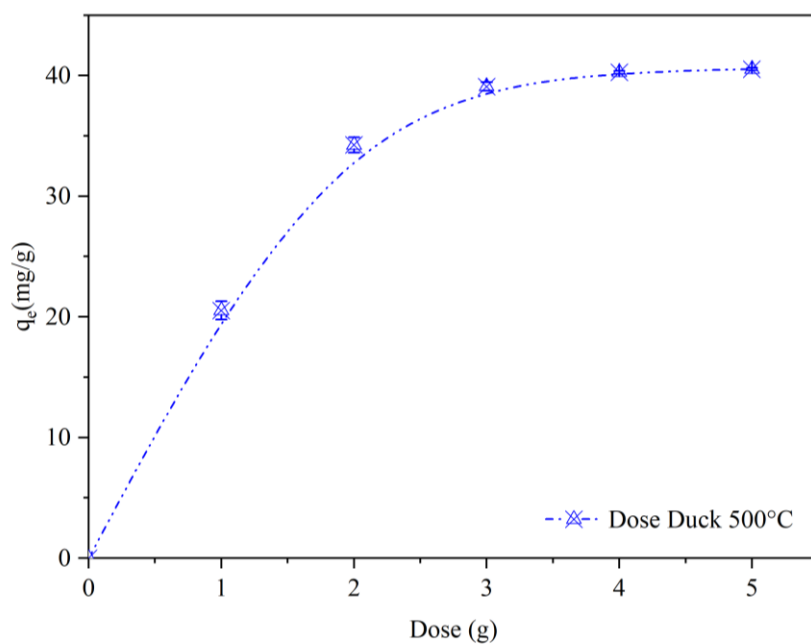
ผลของปริมาณตัวดูดซับและความสามารถในการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่
แสดงใน ภาพประกอบ 28 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับ 0 - 2 g ปริมาณของ
สารละลายที่ถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส
ระหว่างตัวดูดซับและสารละลายและตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของตัวดูดซับ และเมื่อปริมาณตัวดูดซับ
เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3 g ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับเริ่มคงที่ ซึ่งผลของปริมาณตัวดูดซับและ
ความสามารถในการดูดซับคล้ายกับการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่

จากผลการทดลอง ภาพประกอบ 27 (ง) และ ภาพประกอบ 28 (ง) ปริมาณตัวดูดซับ
เท่ากับ 3 g ในถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 500 °C และในถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 500 °C
มีปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับสูงที่สุด สำหรับการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ในขั้นต่อไป เนื่องจาก

การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มากกว่านี้ ส่งผลให้การดูดซับมากขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเป็นการลดปริมาณการใช้ตัวดูดซับด้วย (อดิศักดิ์, 2561)



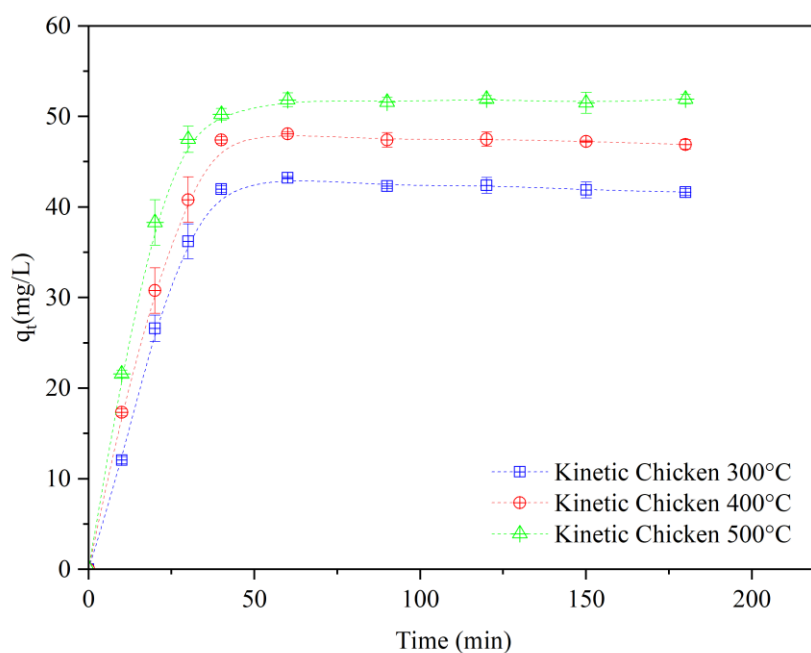
(ฉ)



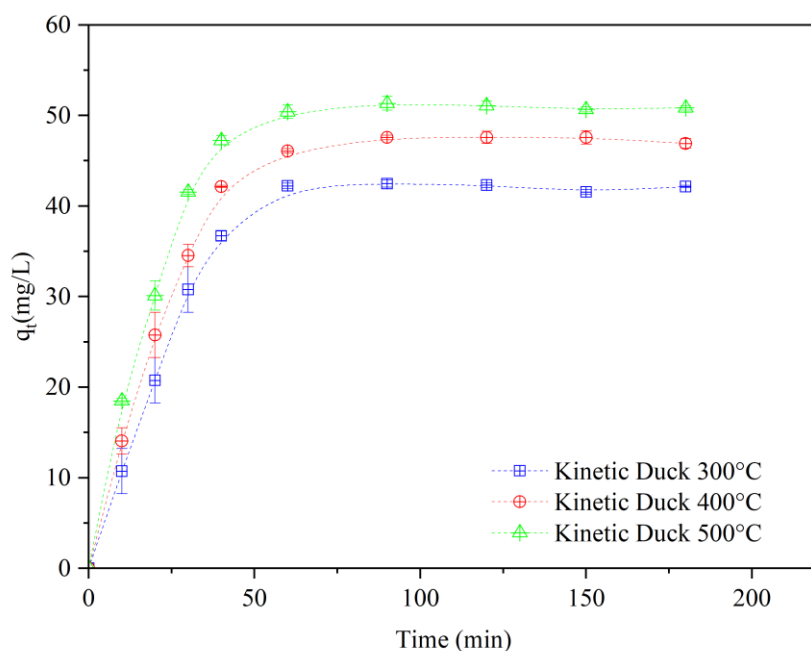
ภาพประกอบ 28 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ
 (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 400 °C (ค) ถ่านชาร์จาก
 กระดุกเปิด 500 °C และ (ง) ผลของการเปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับของถ่านชาร์จาก
 กระดุกเปิดในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

4.3.3 ผลการศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาในการดูดซับ

ผลของเวลา การศึกษาปัจจัยระยะเวลาในการกวนสารละลายโดยใช้ 2 กรัม ในสารละลาย ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิห้อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคือ 0 ถึง 180 นาทีประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์ผ่านซาร์จากกระดูกไก่แสดงในรูปที่ 29 (ก) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายทองแดงสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรกและประสิทธิภาพการกำจัดเริ่มคงที่ในช่วง 60 – 180 นาที และประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์ผ่านซาร์จากกระดูกไก่ แสดงในรูปที่ 29 (ข) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายทองแดงสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 50 นาทีแรก และประสิทธิภาพการกำจัดเริ่มคงที่ในช่วง 60 – 180 นาที ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านซาร์จากกระดูกไก่และกระดูกเป็ดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาหนึ่งและคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งอาจเนื่องมาจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังมีปริมาณมากและเมื่อปริมาณพื้นที่การดูดซับอิ่มตัวความจุการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าและคงที่ ถ่านซาร์จากกระดูกไก่สามารถดูดซับได้มากที่สุดได้แก่ ถ่านซาร์จากกระดูกไก่ 500 °C 51.829 กรัมในช่วงเวลา 60 นาที ก่อนจะเข้าสู่จุดคงที่ ถ่านซาร์จากกระดูกเป็ดสามารถดูดซับได้มากที่สุดได้แก่ ถ่านซาร์จากกระดูกเป็ด 500 °C 51.328 กรัมในช่วงเวลา 90 นาทีหลังจากกราฟเริ่มคงที่ในช่วงเวลา 60 นาที จะเห็นได้ว่าถ่านซาร์จากกระดูกไก่สามารถใช้เวลาน้อยกว่าและดูดซับได้มากกว่า



(ก)



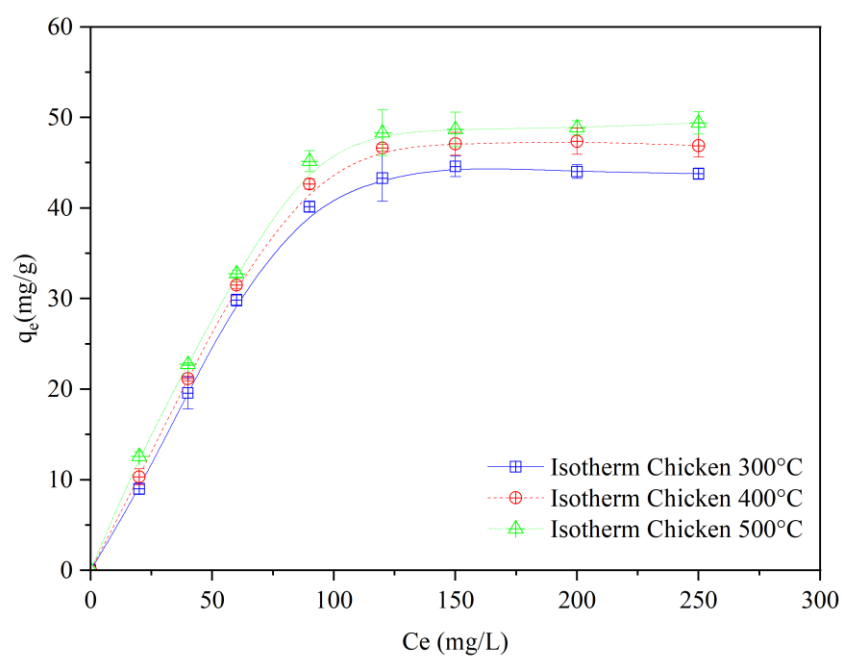
(ข)

ภาพประกอบ 29 ผลการศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาที่มีผลต่อการในการดูดซับ

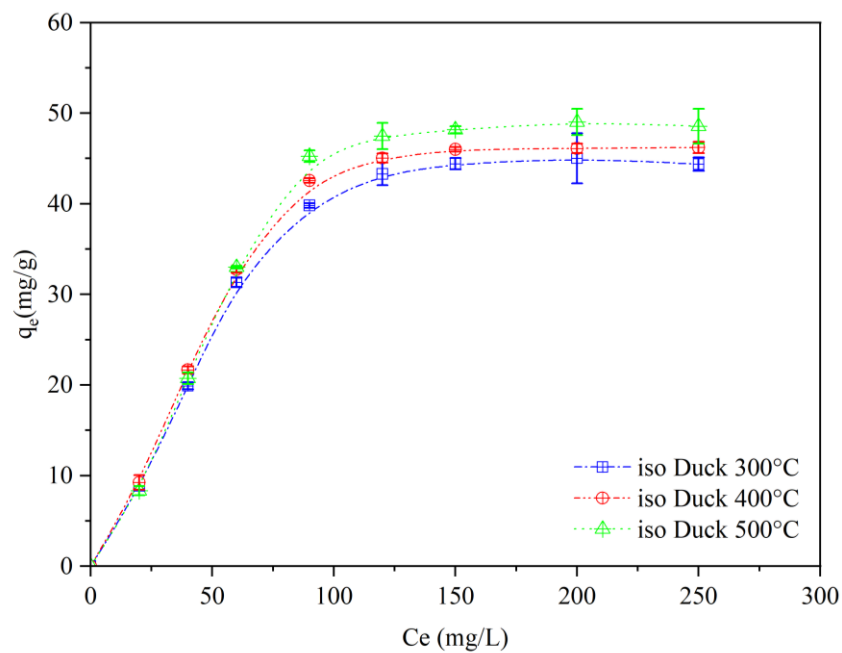
(ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

4.3.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ

การทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายทองแดงสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ ภาพประกอบ 30 (ก) แสดงประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่ ปริมาณสูงสุดที่ดูดซับได้คือ ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C ดูดซับได้ 48.295 มิลลิกรัมต่อกรัม ภาพประกอบ 30 (ข) ปริมาณสูงสุดที่ดูดซับได้คือ ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 500 °C ดูดซับได้ 47.460 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยพบถ่านชาร์จากกระดูกไก่ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด และให้ความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับถ่านชาร์จากกระดูกไก่ และประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทั้งหมด



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 30 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ

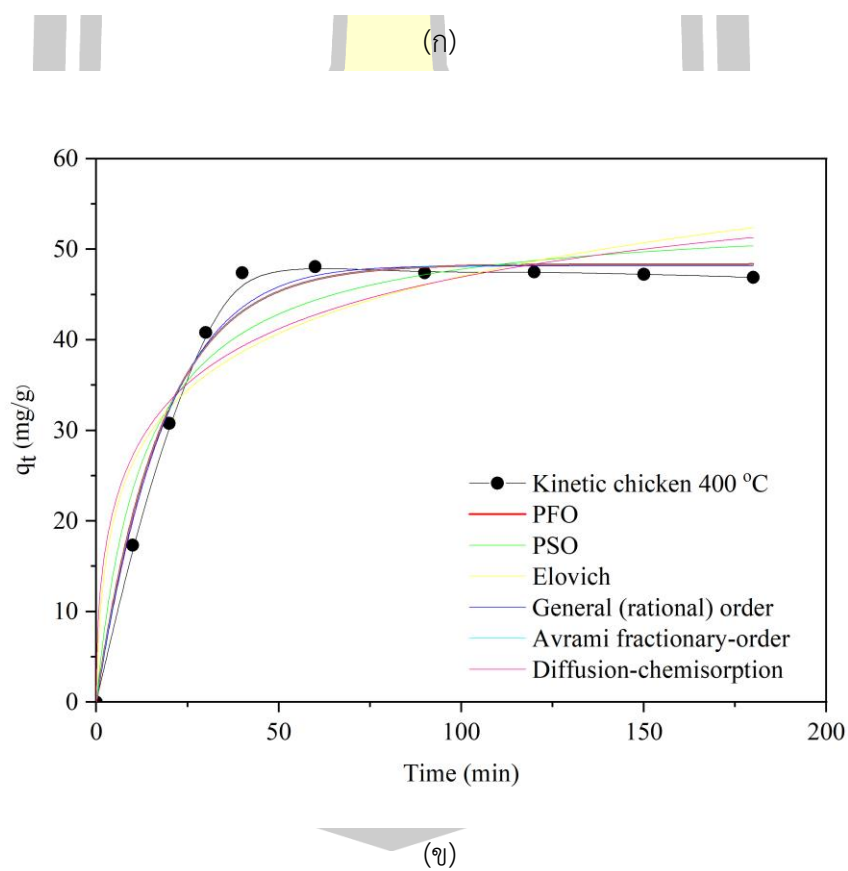
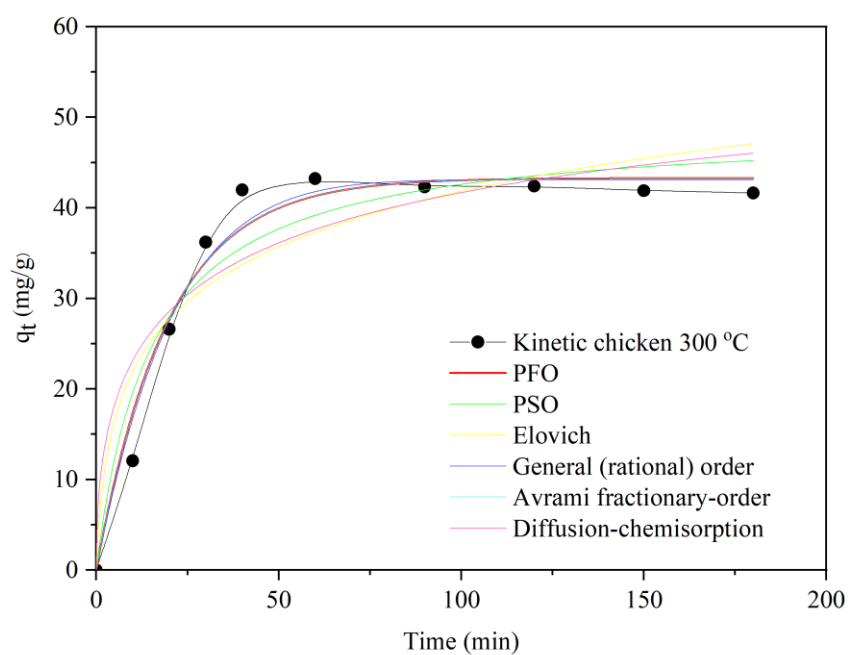
(ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

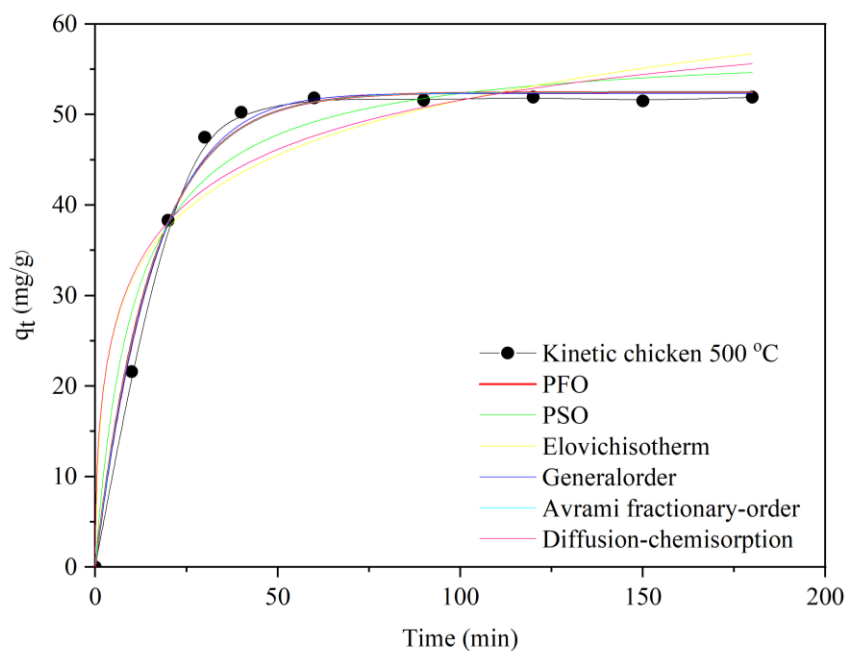
4.3.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic adsorption)

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาสำหรับการดูดซับเป็น 0 - 180 นาที พบว่ามีปริมาณการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลามาทำการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ แสดงตาราง 12 ซึ่งสรุปตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้ง 6 แบบจากตัวดูดซับถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิที่ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) 0.968 0.981 และ 0.994 ตามลำดับให้ผลการวิจัยที่สอดคล้องมากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอื่นๆ เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียงหนึ่งมากกว่า สถิติที่เกี่ยวข้องได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น และผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิที่ 300 °C 400 °C และ 500 °C จากแบบจำลองสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอื่นๆ มีค่าดังต่อไปนี้ แบบจำลอง Pseudo second order R^2 เท่ากับ 0.919 0.941 และ 0.956 แบบจำลอง Avrami fractionary-order R^2 เท่ากับ 0.919 0.941 และ 0.956 ตามลำดับ แบบจำลอง Diffusion-chemisorption R^2 เท่ากับ 0.857 0.888 และ 0.911ตามลำดับ แบบจำลอง Elovich R^2 เท่ากับ 0.854 0.880 และ 0.899 ตามลำดับ และแบบจำลอง R^2 เท่ากับ General (rational) order 0.960 0.980 และ 0.990 ตามลำดับ

สรุปได้ว่า PFO (ลาเกอร์เกรน) เป็นจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เหมาะสมเนื่องจากผลข้อมูลทางสถิติที่แสดง ตารางที่ 4.6 ให้ความเหมาะสมมากกว่าโมเดลจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอื่น ๆ โดยมีความชัดเจนค่าคงที่อัตราคือการรวมกันของการดูดซับและการกำจัดอัตราคงที่และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย กระบวนการนี้มีแนวโน้มที่จะเป็นไปตาม PFO แบบจำลองที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเริ่มต้นสูง ภาพประกอบ 31 (ก) (ข) และ (ค) แสดงข้อมูลถึงความสัมพันธ์ผลการทดลองที่วัดได้กับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C แบบจำลอง PFO สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

พูน ปณ จิต ชีเว





(ค)

ภาพประกอบ 31 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C

(ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C

ตาราง 12 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่

แบบจำลอง	สมการ	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 500 °C
Pseudo first order (PFO)				
q_e		43.285	48.347	52.464
k_1		0.051	0.055	0.064
RCS		7.719	5.110	2.922
RSS	$q_t = \frac{k_2 \cdot q_e^2 \cdot t}{1 + q_e \cdot k_2 \cdot t}$	61.758	40.882	23.381
COD		0.970	0.983	0.991
R^2		0.968	0.981	0.994

ตาราง 12 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกไก่ (ต่อ)

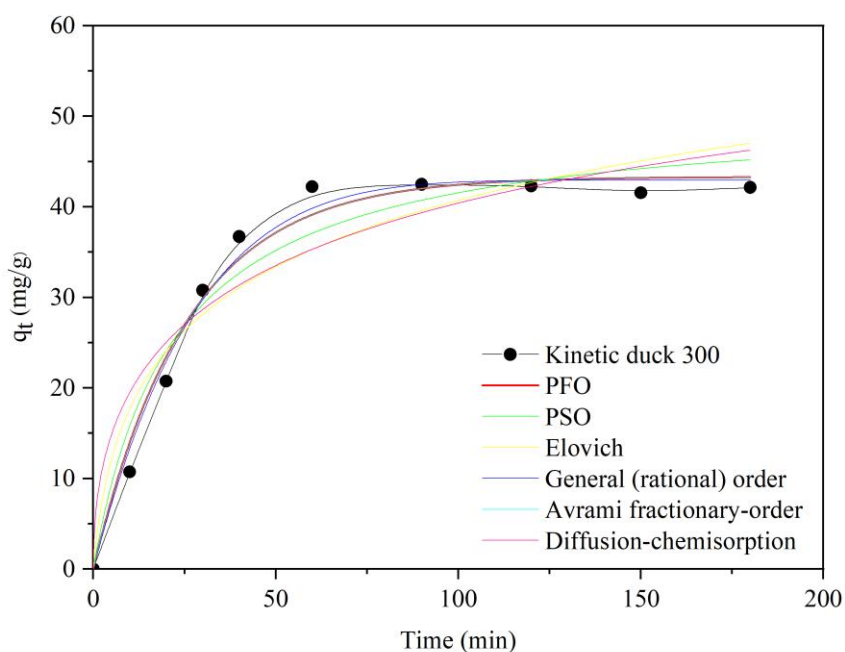
แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 500 °C
Pseudo second order (PSO)			
q_e	48.964	54.032	57.826
k_2	0.001	0.001	0.001
RCS	18.633	16.102	13.464
RSS	149.067	128.81	107.717
COD	0.928	0.947	0.961
R^2	0.919	0.941	0.956
Avrami fractionary-order			
q_e	43.282	48.346	52.466
k_1	0.320	0.334	0.359
n	1.876	0.167	0.179
RCS	8.823	5.840	3.340
RSS	61.759	40.883	23.381
COD	0.970	0.983	0.991
R^2	0.962	0.978	0.989
Diffusion-chemisorption			
q_e	66.229	70.541	72.061
K_2	11.242	14.019	18.148
RCS	33.149	30.448	27.115
RSS	265.193	243.587	216.926
COD	0.873	0.901	0.922
R^2	0.857	0.889	0.912

ตาราง 12 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่ (ต่อ)

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 500 °C
Elovich			
$\alpha_{(e)}$	9.412	15.303	31.436
$\beta_{(e)}$	0.111	0.109	0.114
RCS	33.88	32.580	30.913
RSS	271.040	260.643	247.305
COD	0.870	0.894	0.911
R^2	0.854	0.881	0.899
General (rational) order			
q_e	43.114	48.149	52.307
K_r	0.074	0.079	0.087
n	0.883	0.893	0.909
RCS	6.905	4.247	2.288
RSS	48.337	29.729	16.019
COD	0.977	0.988	0.994
R^2	0.960	0.980	0.991

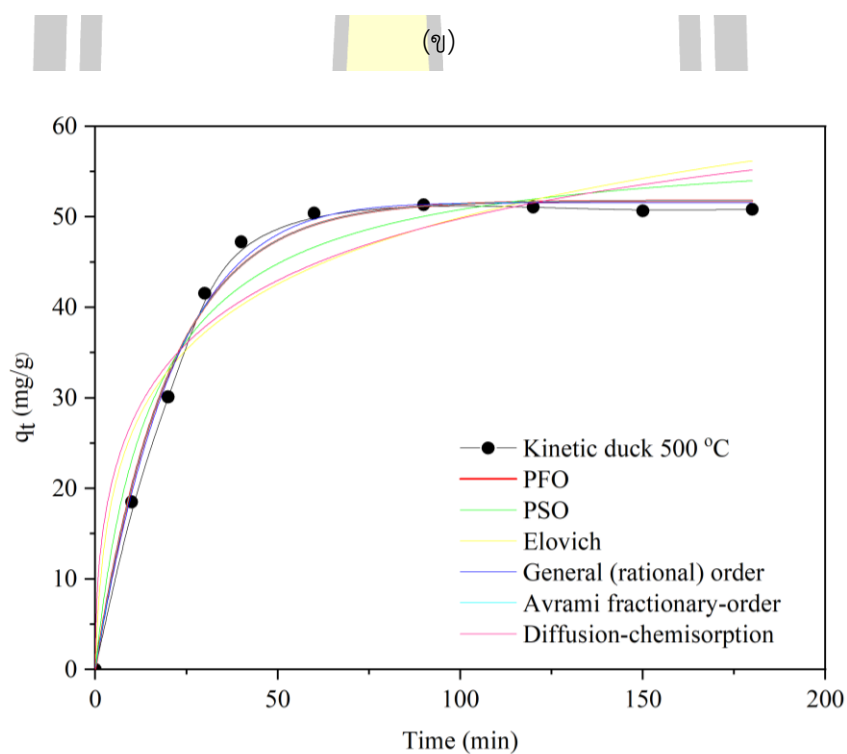
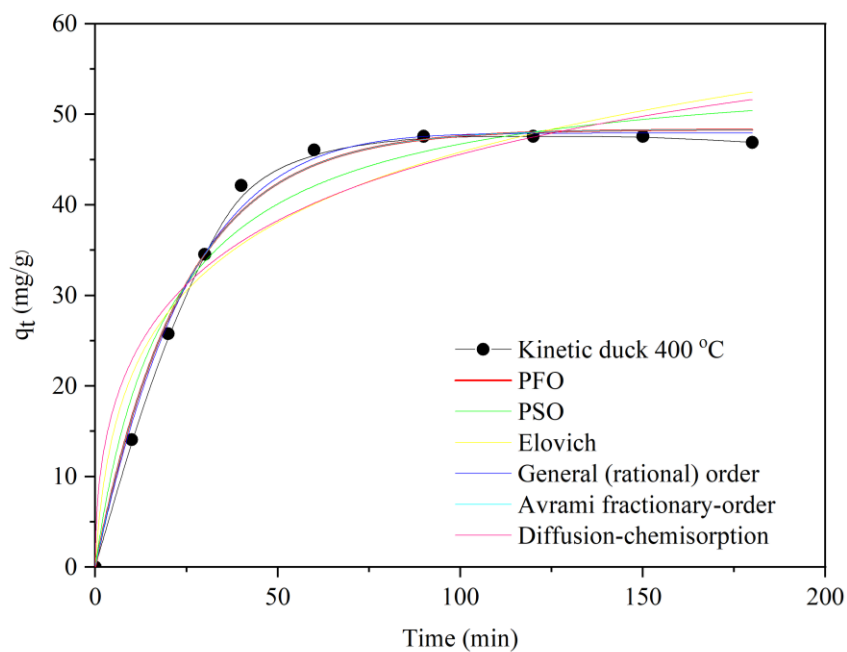
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาสำหรับการดูดซับเป็น 0 - 180 นาที พบว่ามีปริมาณการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลามาทำการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ แสดงตาราง 13 ซึ่งสรุปตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้ง 6 แบบจากตัวดูดซับถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิที่ 300 °C 400 °C และ 500 °C พบว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) 0.979 0.994 และ 0.994 ตามลำดับให้ผลการวิจัยที่สอดคล้องมากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอื่นๆ เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียงหนึ่งมากกว่า สถิติที่เกี่ยวข้องได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น และผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของถ่านชาร์

จากกระดุกเปิดอุณหภูมิที่ 300 °C 400 °C และ 500 °C จากแบบจำลองสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอื่นๆ มีค่าดังต่อไปนี้ แบบจำลอง Pseudo second order R^2 เท่ากับ 0.946 0.962 และ 0.961 แบบจำลอง Avrami fractionary-order R^2 เท่ากับ 0.976 0.988 และ 0.989 ตามลำดับ แบบจำลอง Diffusion-chemisorption R^2 เท่ากับ 0.888 0.911 และ 0.914 ตามลำดับ แบบจำลอง Elovich R^2 เท่ากับ 0.899 0.917 และ 0.912 ตามลำดับ และแบบจำลอง R^2 เท่ากับ General (rational) order 0.964 0.993 และ 0.993 ตามลำดับ ภาพประกอบ 32 (ก) (ข) และ (ค) แสดงข้อมูลถึงความสัมพันธ์ผลการทดลองที่วัดได้กับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 500 °C แบบจำลอง PFO สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด



(ก)

พหุ ประจักษ์ ชีวะ



ภาพประกอบ 32 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C

ตาราง 13 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกเปิด

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 500 °C
Pseudo first order (PFO)			
q_e	43.299	48.327	51.781
k_1	0.039	0.041	0.049
RCS	4.881	2.808	2.748
RSS	39.051	22.466	21.988
COD	0.981	0.991	0.992
R^2	0.979	0.994	0.994
Pseudo second order (PSO)			
q_e	50.719	55.928	58.583
k_2	8.931	9.063	0.001
RCS	12.735	10.679	11.872
RSS	101.883	85.435	94.982
COD	0.952	0.966	0.966
R^2	0.946	0.9621	0.961
Avrami fractionary-order			
q_e	43.299	48.329	51.780
k_1	1.853	0.289	0.314
n	0.021	0.144	0.157
RCS	5.578	3.210	3.141
RSS	39.051	22.467	21.989
COD	0.982	0.991	0.992
R^2	0.976	0.989	0.989

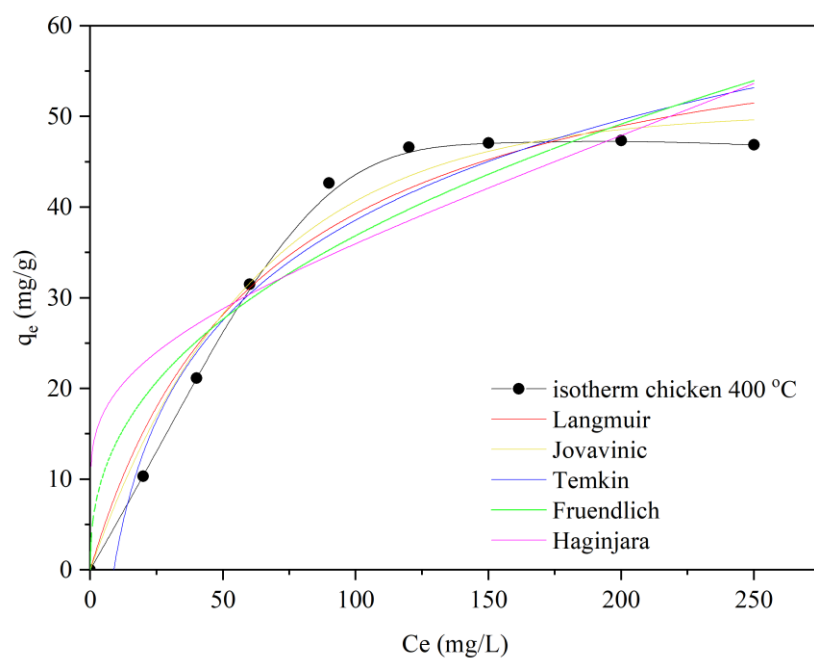
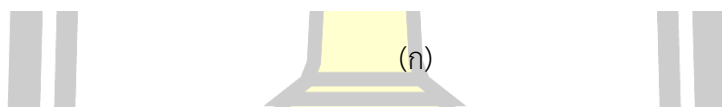
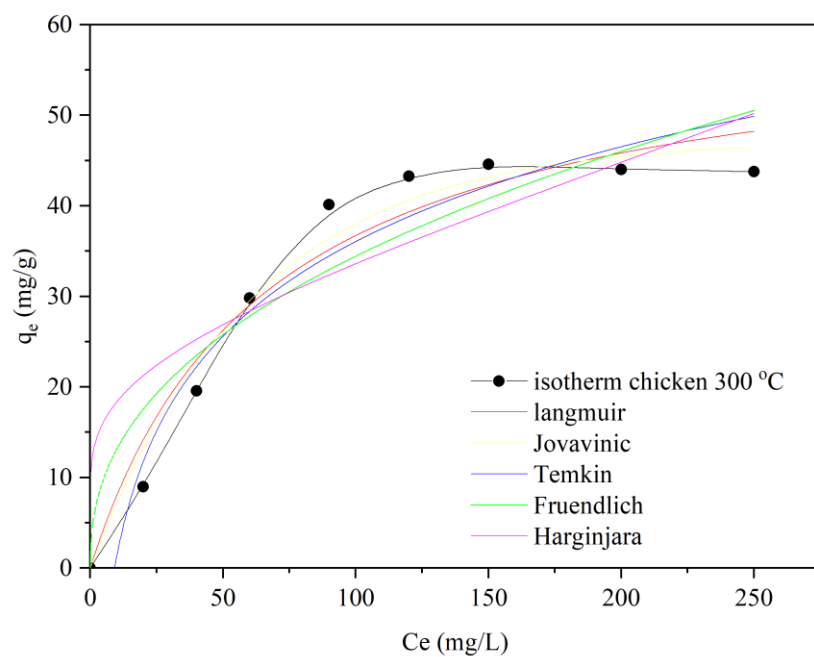
ตาราง 13 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด (ต่อ)

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดูกเป็ด 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกเป็ด 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกเป็ด 500 °C
Diffusion-chemisorption			
q_e	80.199	84.493	80.678
K_2	8.144	9.896	13.008
RCS	26.402	24.951	26.455
RSS	211.216	199.611	211.637
COD	0.901	0.921	0.924
R^2	0.888	0.911	0.914
Elovich			
$\alpha_{(e)}$	4.404	6.106	11.101
$\beta_{(e)}$	0.091	0.087	0.093
RCS	23.853	23.268	27.162
RSS	190.824	186.146	217.299
COD	0.910	0.926	0.922
R^2	0.899	0.917	0.913
General (rational) order			
q_e	42.937	47.909	51.526
K_r	0.064	0.068	0.074
n	0.846	0.858	0.879
RCS	3.677	1.799	1.896
RSS	25.746	12.593	13.277
COD	0.987	0.995	0.995
R^2	0.964	0.994	0.994

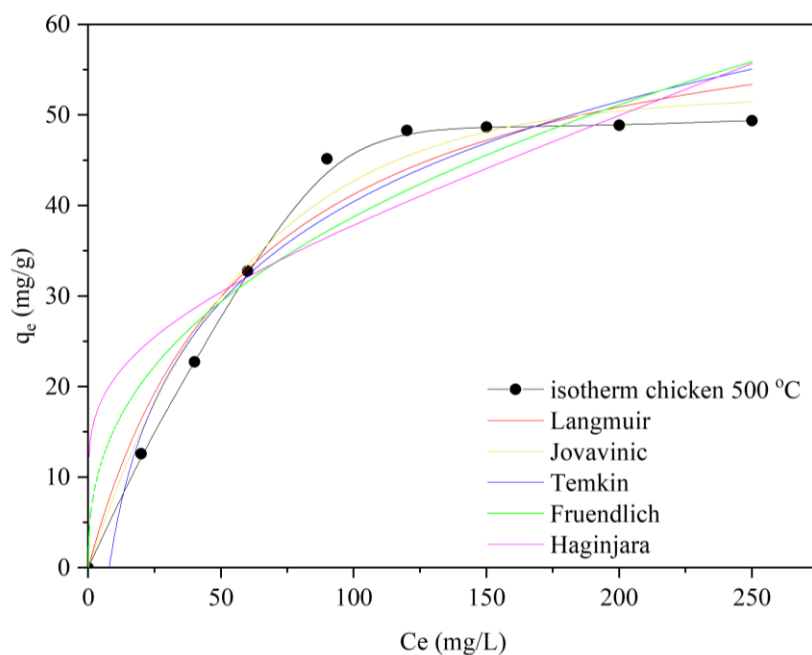
4.3.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ผลการทดลองพฤติกรรมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่ที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C บนผิววัสดุดูดซับแต่ละชนิดในสถานะที่เหมาะสมที่แสดงใน ตาราง 14 โดยใช้สมการไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์ ไอโซเทอมของการดูดซับของฟรุนดลิช ไอโซเทอมของการดูดซับของเทมคิน ไอโซเทอมของการดูดซับของโจวโรนิก ไอโซเทอมของการดูดซับของฮากินจารา ภาพประกอบ 33 (ก) (ข) และ (ค) แสดงข้อมูลที่ตรงกับข้อมูลทั้งห้าที่นำเสนอแบบจำลองยืนยันข้อสรุปที่ได้ออกมาด้วยสายตาการเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลข เพื่อตรวจสอบข้อมูลที่คาดการณ์ไว้กับข้อมูลที่วัดได้ และค่า สำหรับแนวโน้มที่บ่งชี้ว่าเหมาะสมโมเดล โดยค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าความจุการดูดซับทางทฤษฎี ได้จากการศึกษาผลไอโซเทอมการดูดซับแสดงดังตาราง 14 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์ด้วยถ่านชาร์จากกระดูกไก่ที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด 0.971 0.973 0.980 ตามลำดับ มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของโจวโรนิกมากกว่าไอโซเทอมของการดูดซับที่เหลือ สมการโจวโรนิกใช้ในการอธิบายการดูดซับโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารในสถานะสมดุลต่อปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารในสถานะสมดุลเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการล็อกความเข้มข้นของสารในสถานะสมดุล และการเพิ่มขึ้นของปริมาณของสารที่ถูกดูดซับจะช้าลง สมการโจวโรนิกสามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์และเข้าใจกระบวนการการดูดซับในระบบสมดุลกัมมันตภาพได้ และถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C ซึ่งมีค่า R^2 0.9780 ใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุดจากทั้ง 3 อุณหภูมิความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 52.154 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าค่า q_m ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง





(u)



(ค)

ภาพประกอบ 33 ไอโซเทอมของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C

ตาราง 14 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกไก่

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 500 °C
Freundlich			
k_f	5.012	5.437	6.148
n_f	2.389	2.406	2.501
RCS	35.091	36.985	34.834
RSS	245.634	258.893	243.841
COD	0.894	0.901	0.911
R^2	0.879	0.887	0.898

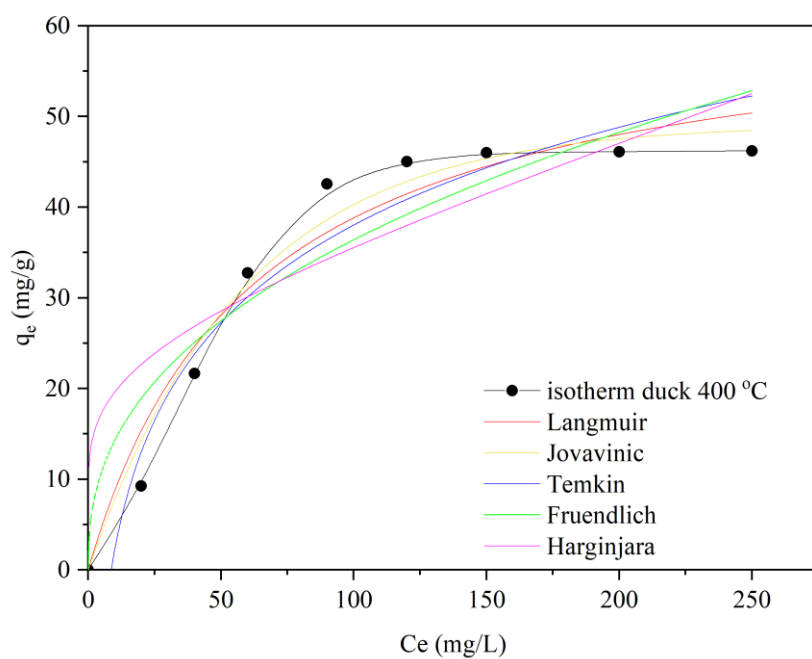
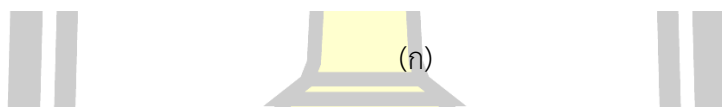
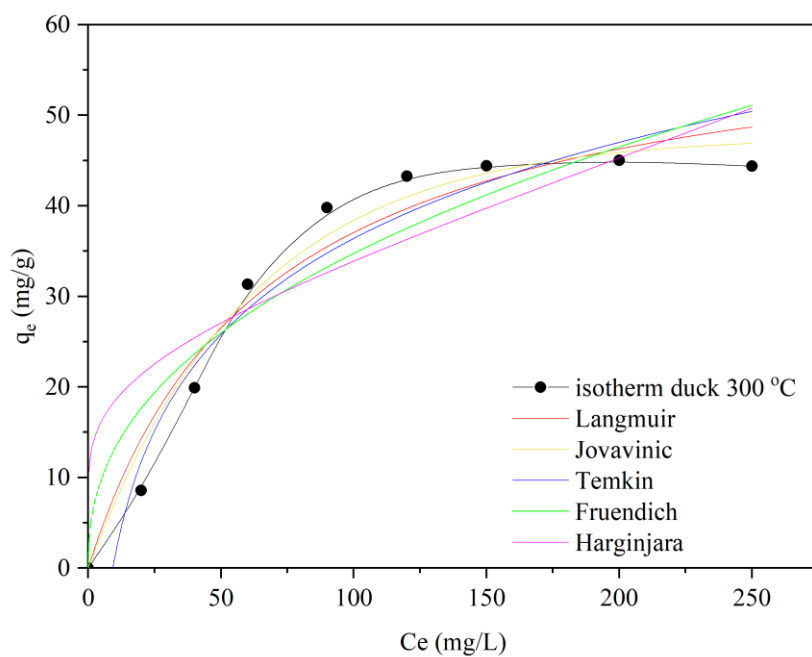
ตาราง 14 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกไก่ (ต่อ)

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 500 °C
Langmuir			
q_m	60.969	64.968	66.386
k_l	0.015	0.015	0.016
RCS	15.399	15.681	14.110
RSS	107.795	109.770	98.772
COD	0.953	0.958	0.964
R^2	0.947	0.952	0.958
Harkin-Jura			
a_H	80.863	86.963	93.936
b_H	3.203	3.208	3.241
RCS	52.546	56.015	52.798
RSS	367.822	392.107	369.586
COD	0.841	0.850	0.865
R^2	0.819	0.828	0.846
Jovanovic			
q_m	47.692	49.120	52.471
K_{th}	0.016	0.017	0.015
RCS	8.009	8.828	14.034
RSS	56.062	61.797	98.243
COD	0.976	0.975	0.966
R^2	0.971	0.973	0.980
Temkin			
b_t	15.095	15.945	15.955
k_t	0.112	0.112	0.126
RCS	16.923	17.772	17.444

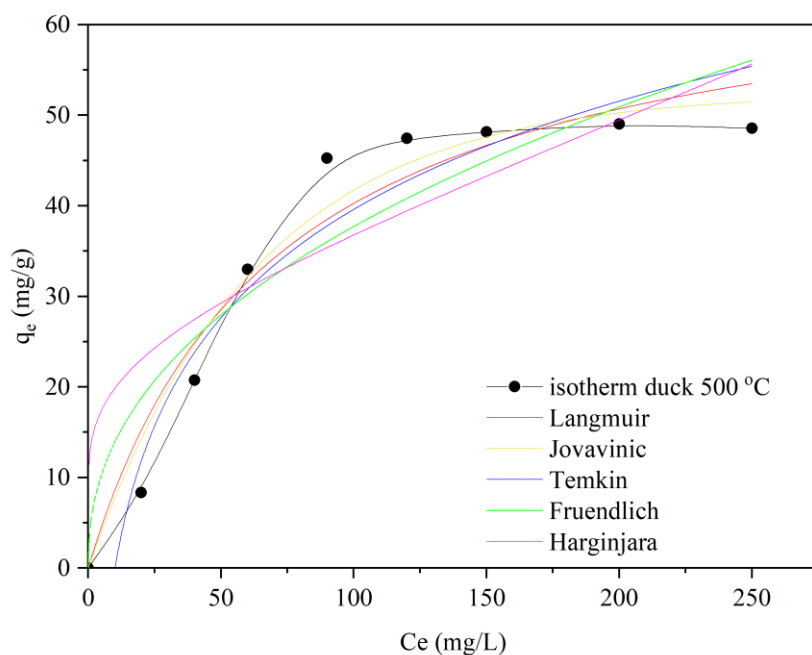
ตาราง 14 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกเปิด (ต่อ)

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกไก่ 500 °C
Temkin			
<i>RSS</i>	118.464	124.409	122.112
<i>COD</i>	0.949	0.952	0.955
<i>R²</i>	0.941	0.945	0.949

ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกเปิดที่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C บนผิววัสดุดูดซับแต่ละชนิดในสภาวะที่เหมาะสมที่แสดงใน ตาราง 15 โดยใช้สมการไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์ ไอโซเทอมของการดูดซับของฟรุนดลิช ไอโซเทอมของการดูดซับของเทมกิน ไอโซเทอมของการดูดซับของโจวินิก ไอโซเทอมของการดูดซับของฮากินจารา ภาพประกอบ 34 (ก) (ข) และ (ค) แสดงข้อมูลที่เหมาะสมกับข้อมูลทั้งห้าที่นำเสนอแบบจำลองยืนยันข้อสรุปที่ได้ออกมาด้วยสายตาการเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลข เพื่อตรวจสอบข้อมูลที่คาดการณ์ไว้กับข้อมูลที่วัดได้ และค่า สำหรับแนวโน้มที่บ่งชี้ว่าเหมาะสมโมเดล โดยค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าความจุการดูดซับทางทฤษฎี ที่ได้จากการศึกษาผลไอโซเทอมการดูดซับแสดงดังตาราง 15 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์ด้วยถ่านชาร์จากกระดุกเปิด อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด 0.973 0.972 0.961 ตามลำดับ มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของโจวินิกมากกว่าไอโซเทอมของการดูดซับที่เหลือและถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 300 °C ซึ่งมีค่า R^2 0.973 ใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุดจากทั้ง 3 อุณหภูมิ ความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 47.693 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าค่า q_m ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งผลการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกไก่



(u)



(ค)

ภาพประกอบ 34 ไอโซเทอมของการดูดซับ (ก) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 300 °C (ข) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 400 °C (ค) ถ่านชาร์จากกระดุกเปิด 500 °C

ตาราง 15 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกเปิด

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดุกเปิด 500 °C
Freundlich			
k_f	5.005	5.595	5.129
n_f	2.377	2.459	2.308
RCS	34.475	38.095	48.318
RSS	241.331	266.669	338.230
COD	0.898	0.894	0.884
R^2	0.883	0.879	0.868

ตาราง 15 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด (ต่อ)

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดูกเป็ด 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกเป็ด 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกเป็ด 500 °C
Langmuir			
q_m	61.604	62.862	68.454
k_l	0.0151	0.0161	0.014
RCS	14.629	16.295	22.757
RSS	102.408	114.071	159.304
COD	0.956	0.954	0.945
R^2	0.950	0.948	0.938
Harkin-Jura			
a_H	81.028	87.489	86.204
b_H	3.195	3.230	3.172
RCS	52.239	56.306	71.753
RSS	365.673	394.146	502.274
COD	0.845	0.844	0.828
R^2	0.823	0.822	0.804
Jovanovic			
q_m	47.692	49.121	52.472
K_{th}	0.016	0.017	0.016
RCS	8.008	8.828	14.034
RSS	56.062	61.797	98.243
COD	0.976	0.975	0.966
R^2	0.973	0.972	0.961
Temkin			
b_t	15.309	15.548	17.250
k_t	0.107	0.115	0.099
RCS	15.672	18.318	22.907

ตาราง 15 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด (ต่อ)

แบบจำลอง	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 300 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 400 °C	ถ่านชาร์จาก กระดูกไก่ 500 °C
Temkin			
<i>RSS</i>	109.710	128.229	160.352
<i>COD</i>	0.953	0.949	0.945
<i>R</i> ²	0.947	0.942	0.938

4.3.6 อุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic)

อุณหพลศาสตร์ เป็นการศึกษาเพื่อทำนายการเกิดขึ้นเองได้ของกระบวนการดูดซับ โดย ศึกษาอุณหภูมิตั้งแต่ 298 ถึง 318 เคลวิน แสดงดังตารางที่ 16 และ ตารางที่ 17 สามารถ คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีและการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจากความชัน และจุดตัดของ สมการ นอกจากนั้นยังสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ค่าพารามิเตอร์ทาง อุณหพลศาสตร์ของถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C สามารถสรุปดัง ตารางที่ 16 พบว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเท่ากับ -55.7703, -58.6552 และ -67.8064 kJ/mol ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นการ คายความร้อน การลดอุณหภูมิจะเพิ่ม ความสามารถในการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ สำหรับการเปลี่ยนแปลง พลังงาน อิสระของกิบส์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -22.18, -22.37 และ -22.74 kJ/mol ซึ่งมีค่าติดลบ แสดง ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับ สามารถเกิดขึ้นเองได้

ค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C สามารถสรุปดังตารางที่ 17 พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี -71.2476, -80.2575 และ -89.7579 kJ/mol ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นการ คายความร้อน การลด อุณหภูมิจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ สำหรับ การเปลี่ยนแปลงพลังงาน อิสระของกิบส์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -22.670, -22.921 และ -22.854 kJ/mol ซึ่งมีค่าติดลบ ผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดมี ความสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกัน

ตาราง 16 อุณหพลศาสตร์ถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

อุณหภูมิ (เคลวิน)	L_{Langmuir} (l mg ⁻¹)	L_{Langmuir} (l mol ⁻¹)	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (JK ⁻¹ mol ⁻¹)	1/T	lnk	$\Delta S.T$
ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 300 °C								
298	0.015	3657.82	-20.474			0.003	8.204	76.24
303	0.025	6160.8	-21.753	-55.7703	0.26	0.003	8.725	77.52
313	0.045	11065.2	-24.312			0.003	9.311	80.08
ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 400 °C								
298	0.015	3694.06	-20.592			0.003	8.214	79.24
303	0.028	6982.24	-21.922	-58.6552	0.27	0.003	8.851	80.57
313	0.049	12031.6	-24.581			0.003	9.395	83.23
ถ่านชาร์จากกระดูกไก่ 500 °C								
298	0.016	3964.65	-20.754			0.003	8.285	88.56
303	0.032	7847.16	-22.240	-67.8064	0.30	0.003	8.967	90.04
313	0.063	15370.5	-25.212			0.003	9.640	93.01

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตาราง 17 อุณหพลศาสตร์ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดอุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C

อุณหภูมิ (เคลวิน)	L_{Langmuir} (l mg ⁻¹)	L_{Langmuir} (l mol ⁻¹)	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (JK ⁻¹ mol ⁻¹)	1/T	lnk	$\Delta S.T$
ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 300 °C								
298	0.015	3648.16	20.615			0.003	8.201	91.86
303	0.032	7924.48	-22.157	-71.247	0.31	0.003	8.977	93.40
313	0.063	15317.4	-25.239			0.003	9.636	96.48
ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 400 °C								
298	0.016	3901.84	-20.663			0.003	8.269	100.9
303	0.033	7972.8	-22.357	80.257	0.34	0.003	8.983	102.6
313	0.078	19062.2	-25.743			0.003	9.855	106.0
ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด 500 °C								
298	0.014	3450.04	-20.389			0.003	8.146	110.1
303	0.032	7731.2	-22.238	89.757	0.37	0.003	8.953	111.9
313	0.084	20366.8	-25.934			0.003	9.921	115.6

พหุ ประถมศึกษา

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ได้นำเศษกระดูกไก่และกระดูกเป็ดที่มีเพิ่มมากขึ้นตามร้านอาหารในปัจจุบันมาทำการทดลองเผาให้เป็นถ่านชาร์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับน้ำเสีย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษกระดูกและนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยเริ่มดำเนินการจากการเก็บรวบรวมเศษกระดูกไก่และกระดูกเป็ดจากร้านอาหารรอบมหาวิทยาลัยมหาสารคาม และนำเศษกระดูกเข้าสู่กระบวนการเผา โดยวิธีการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis Process) ที่อุณหภูมิ 300°C 400°C และ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และได้ นำเศษกระดูกที่กลายเป็นถ่านชาร์ มาทำการบดละเอียดเพื่อไปศึกษาลักษณะทางกายภาพและการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ซิเตรทในรูปแบบสารละลายกรด ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

ถ่านชาร์จากกระดูกไก่และถ่านชาร์จากกระดูกเป็ดมีพื้นผิวสัมผัสมีเนื้อละเอียด มีเศษผงสีดำจากติดอยู่บริเวณถ่าน ถ่านกระดูกที่ได้มีลักษณะเปราะมีความแข็งแรงน้อยกว่ากระดูกก่อนการเผา ถ่านกระดูกมีสีดำเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนเซชันระหว่างไพโรไลซิส ซึ่งสรุปได้ว่าการเผามีส่วนทำให้ลักษณะทางกายภาพของกระดูกเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะทางกายภาพของกระดูกไก่และกระดูกเป็ดก่อนการเผามีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและมีพื้นผิวดั้งแต่พื้นผิวหยาบไปจนถึงพื้นผิวเรียบ พื้นผิวของกระดูกมีความขรุขระที่รูปทรงเรขาคณิตไม่เปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ได้รับการเผาแล้วพบว่า พื้นผิวของถ่านกระดูกมีรูพรุนมากกว่า ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพบนพื้นผิวของวัสดุพบว่าก่อนการเผามีธาตุแคลเซียมและธาตุคาร์บอนสูงกว่าและลดลงไปหลังจากกระบวนการเผา ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ได้จากถ่านชาร์กระดูกไก่ เผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C และ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีพีคของการ เลี้ยวเบน 2θ ที่ 32.26° , 39.66° , 53.88° และ 53.31° มี Graphite อยู่ที่ 2θ ของ 25.80° และมีพีคบางส่วนของ Ca(OH)_2 ปรากฏ 2θ ที่ 46.73° , 49.51° เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด เผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C และ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีพีคของการ เลี้ยวเบน 2θ ที่ 31.90° , 39.62° , 53.88° และ 53.29° มี Graphite อยู่ที่ 2θ ของ 25.90° และมีพีคบางส่วนของ Ca(OH)_2 ปรากฏ 2θ ที่ 46.57° , 49.49° ถ่านชาร์ทั้งสองชนิดมีการทำปฏิกิริยาและแสดงพีคในลักษณะเดียวกัน ผลการศึกษา FT-IR สเปกตรัมของกระดูกไก่และกระดูกเป็ดก่อนการเผา พบแถบการสั่นของหมู่ $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{Cl}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{H}$ แสดงว่ากระดูกมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์หลายชนิด ซึ่ง FT-IR สเปกตรัมของ

กระดุกหลังจากกระบวนการเผาพบว่า ตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) ที่บริเวณ $2,500-3,500\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching) หายไปพบแถบการสั่นของหมู่ C – C, C – Cl, C – N ลักษณะการแสดงพีกเป็นลักษณะพีกหลักของถ่านไบโอชาร์ ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับและการคายการดูดซับของไนโตรเจน จัดเป็นไอโซเทอร์ม Type III เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ และผลการวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด $102.8218\text{ ตร.ม./กรัม}$ และถ่านชาร์จากกระดุกเปิด $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด $84.1812\text{ ตร.ม./กรัม}$ ความพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 6-12 นาโนเมตร จำแนกขนาดเป็นรูพรุนขนาดกลางหรือ mesopore คือรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ช่วงจาก 2 - 50 นาโนเมตร สรุปได้ว่า อุณหภูมิในการเผาสามารถ เพิ่มพื้นที่ผิวของสารดูดซับ เนื่องจากความร้อนจะไปทำลายสารประกอบอินทรีย์ที่ติดอยู่บนผิวของสารดูดซับและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

5.2 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายด้วยถ่านชาร์จากกระดุกไก่อและถ่านชาร์จากกระดุกเปิด

ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายด้วยถ่านชาร์จากกระดุกไก่อและถ่านชาร์จากกระดุกเปิดสามารถสรุปได้ดังนี้ อิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับสามารถดูดซับได้ดีที่ค่า pH เป็นกลางค่อนข้างเป็นเบสเฉลี่ยอยู่ที่ 6-9 ค่า pH สูงที่สุดของการดูดซับคือค่าการดูดซับของถ่านชาร์จากกระดุกไก่ออุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ pH_{pzc} อยู่ที่ 9.978 ซึ่งถ่านทั้งสองชนิดในอุณหภูมิที่ แตกต่างกันมีค่าสุดท้ายของ pH หลังกระบวนการดูดซับอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษ ปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณตัวดูดซับอยู่ในช่วง 0 - 2 g และเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3 g การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มากขึ้น ส่งผลให้การดูดซับมากขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ผลการศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาในการดูดซับพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายทองแดงสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรกและประสิทธิภาพการกำจัดเริ่มคงที่ในช่วง 60 – 180 นาที ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาหนึ่งและคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งเนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังมีปริมาณมากและเมื่อปริมาณพื้นที่การดูดซับอิ่มตัวความจุการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าและคงที่ ถ่านชาร์จากกระดุกไก่อ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถดูดซับได้มากที่สุดคือ 51.829 กรัม ในช่วงเวลา 60 นาที ก่อนจะเข้าสู่จุดสมดุล ผลการศึกษ ความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าถ่านชาร์จากกระดุกไก่อ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด 48.295 มิลลิกรัมต่อกรัม และให้ความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับถ่านชาร์จากกระดุกเปิด ประสิทธิภาพการดูดซับที่ 47.460 mg/g และประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทั้งหมด ผลการศึกษากลไกการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาสำหรับการดูดซับเป็น 0 - 180 นาที พบว่ามีปริมาณการดูดซับสารละลายเพิ่มขึ้นสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมให้ผลการวิจัยที่สอดคล้องมากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

และสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอื่นๆ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 ใกล้เคียงหนึ่งมากกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองพฤติกรรมของการดูดซับโดยใช้สมการไอโซเทอมของการดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของโจวินิค (Jovanovic) มากกว่าไอโซเทอมของการดูดซับอื่นๆ กล่าวคือการดูดซับโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารในสถานะสมดุลต่อปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ ความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 52.15379 mg/g ซึ่งมีค่า q_m ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง และผลจากการศึกษาอุณหพลศาสตร์พบว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเท่ากับ -67.8064 kJ/mol และพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ยเท่ากับ -22.74 kJ/mol แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็น กระบวนการคายความร้อนและสามารถเกิดขึ้นเองได้

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมจากถ่านชาร์จากกระดูกไก่อุณหภูมิ 500 °C ปริมาณตัวดูดซับ 3 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CV 120 mg/L เวลาในการดูดซับ 60 นาที pH 9.978 และอุณหภูมิ 25 °C ไอโซเทอมแบบของโจวินิค มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.97955 และสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสรุปได้ว่าถ่านชาร์จากกระดูกไก่ และกระดูกเป็ดมีความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำเสียได้ดี เนื่องจากถ่านที่เตรียมได้มีโครงสร้างที่มีพื้นผิวจำเพาะ (specific surface area) ซึ่งทำให้มีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับน้ำเสียหรือสารเคมีได้โดยมีปริมาณที่มากขึ้น จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริง สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนทองแดงได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ศึกษาการดูดซับสารละลายจากโลหะหนักชนิดอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะต่อไป
- 5.3.2 ควรมีการศึกษาการผลิตถ่านชาร์จากกระดูกโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี
- 5.3.3 ควรมีการเพิ่มสภาวะในการทดลอง เช่น เพิ่มช่วงอุณหภูมิการเผาให้สูงขึ้น เพิ่มช่วงเวลาในการเผา

พูน ปณ จิต ชีวะ

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กลุ่มวิจัยและพัฒนาสัตว์ปีก สำนักพัฒนาพันธุ์สัตว์ กรมปศุสัตว์. (2559). **คู่มือการเลี้ยงเป็ด**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- กะรัตลักษณ์ เหลี่ยมเพชร. (2562, 10 ตุลาคม). **Food Waste ปัญหาร่วมระหว่างเราและโลก (1)**. กรุงเทพฯธุรกิจ, [ไม่ปรากฏเลขหน้า.]
- กุลนันท์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อารณวิธานพ. (2558). **ไพโรไลซิส (Pyrolysis)**. พลังงานและสิ่งแวดล้อม, 61-64
- ชยพงศ์ ชื่นธีรพงศ์, นายศิริพงษ์ ชะรุณรัมย์. **การศึกษาการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) ในสารละลายด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ โซเดียมวาย และเปลือกมะพร้าว**. บุรีรัมย์: มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์; 2556.
- ชัชฎาภา เกตุวงศ์, ภาณุวัฒน์ เกตุวงศ์, รัตติยาภรณ์ ไปนา, มณฑการ รังเพีย. **การดูดซับทองแดง (II) ในน้ำเสีย ด้วยไคโตซานที่สกัดจากเปลือกปูม้า**. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม; [ม.ป.พ.].
- ฐิตียา แซ่ปึง, ทศพร ทองเอก, วุฒิพงษ์ ศิลปะวิศาล, ศรัณย์ธร งามดี. **การดูดซับทองแดง (II) จากสารละลายโดยใช้เปลือกส้มโอ**. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12. 8-9 ธ.ค. 2558; นครปฐม. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2558. หน้า 1651-1659
- บุญเมธา แนนหนา. (2558). **ปักธงส่งออกเนื้อเป็ดไทยในตลาดโลก**. ค้นเมื่อ 25 มกราคม 2566, จาก <https://s.isanook.com/mn/0/ud/60/302369/992f8a5722db563249015b067cfd8>
- พรพรรณ พนาปวุฒิกุล. (2549). **โลหะหนัก: ตัวการปัญหา สิ่งแวดล้อม, ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้าน สารเคมี**. หน่วยข้อเสนอแนะลดอันตรายและความปลอดภัย, ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และของเสียอันตราย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พินิจภณ ปิตุยะ. (2557). **เอกสารองค์ความรู้เรื่องถ่านชีวภาพ**. เพชรบุรี: ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. (แผ่นพับ).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- พาขวัญ ยงยศยิ่ง. (2562). **รูปแบบการเลี้ยงไก่เนื้อในระบบอุตสาหกรรม (Broiler rearing system in poultry industry)**. ภาควิชาสัตวศาสตร์คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- วรวิทย์ จันท์สุวรรณ. (2558). **ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ**. (รายงานการวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร: ม.ป.ท.
- วัชนิดา ชินผา และอดิศักดิ์ คีรีรัก. (2561). **การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีครีस्टัลไวโอเลต**. วิทยานิพนธ์ วท.ม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วิเชียร ทิงาม และปนัดดา เตจ๊ะมาเรื่อน. (2566). **สถานการณ์ “ไก่เนื้อ” และแนวโน้ม ปี 2566**. ค้นเมื่อ 25 มกราคม 2566, จาก <https://pasusart.com>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2566). **ไก่เนื้อ**. ค้นเมื่อ 25 มกราคม 2566, จาก <https://mis-app.oae.go.th/product>
- สุดารัตน์ สมบัติศรี, ชัยยศ จันท์แก้ว, ปกิต กำบุญมา, วิณา รองจะโปะ. **การดูดซับทางชีวภาพของแดง(II) ด้วยไฟโบรอินจากรังไหมเหลือทิ้ง**. ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ม.ค.เม.ย. 2558; 17(1) : 51-59
- อนิสา ทรัพย์นิวัตต์, มณฑล ฐานุตตมวงศ์, และอรรณพ หอมจันทร์. **การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ)**. การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. (หน้า411-418).
- Augustus Newton Ebelegi, N. A., Donbebe Wankasi (2020). "Interpretation of Adsorption Thermodynamics and Kinetics." Open Journal of Physical Chemistry, 3.
- Azargohar, R., & Dalai, A. K. (2008). Steam and KOH activation of biochar: Experimental and modeling studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 110(2-3), 413-

บรรณานุกรม (ต่อ)

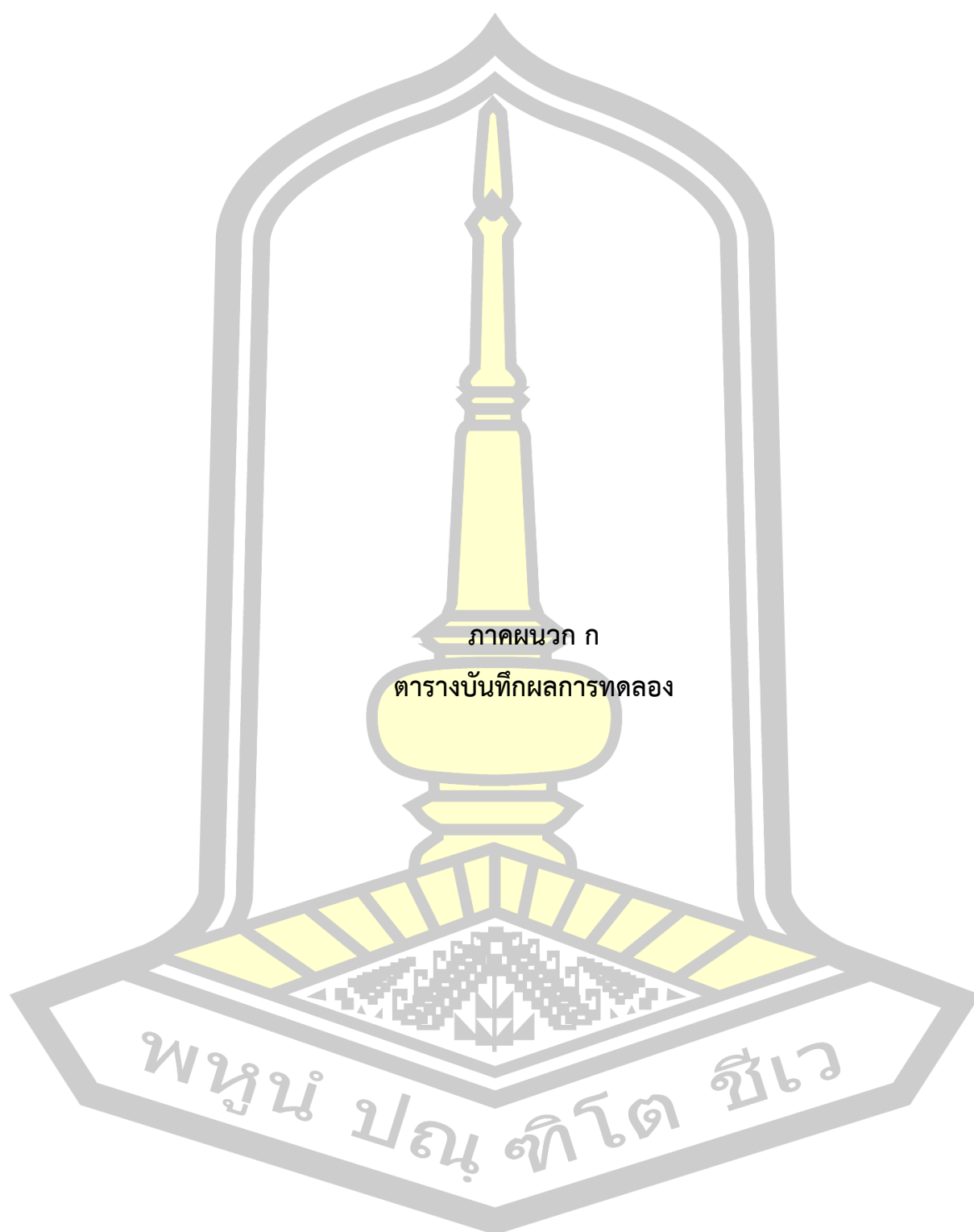
- Azizian, S. (2004). "Kinetic Models of Sorption: A Theoretical Analysis." Colloid and Interface Science, 276.: 47-52.
- Carabineiro, S. A. and B. E. Nieuwenhuys (2009). "Adsorption of small molecules on gold single crystal surfaces." Gold Bulletin 42: 288-301.
- Chen, Y., Zhang, X., Chen, W., Yang, H., & Chen, H. (2017). "The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance." Bioresource technology.: 101-109.
- Ellingham, S. T., et al. (2018). "Scanning electron microscopy–energy-dispersive X-ray (SEM/EDX): a rapid diagnostic tool to aid the identification of burnt bone and contested cremains." Journal of forensic sciences 63(2): 504-510.
- Fawell, J. (2006). Fluoride in drinking-water: 47.
- Haerifar, M. a. A., S. (2012). "Fractal-Like Adsorption Kinetics at the Solid/Solution Interface." The Journal of Physical Chemistry C, 116.: 13111-13119.
- Horowitz, H. M., FJ; Law, FE (1967). "Partial defluoridation of a community water supply and dental fluorosis." Public Health Reports.: 82.
- Lehmann, J. (2009). "Biochar for environmental management." Joseph (Ed.). London: Earthscan.: 1-5.
- Marczewski, A. W. (2010). "Analysis of Kinetic Langmuir Model." A New Complete Analytical Solution of the Langmuir Rate Equation. 2: 15229-15238.
- Mjengera, H. M., G. (2003). "Appropriate defluoridation technology for use in fluorotic areas in Tanzania." Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C: 1097-1104.
- Neeratanaphan, L. (2011). ". Effect of heavy metal on mollusk." KKU Science Journal 39: 375-386

บรรณานุกรม (ต่อ)

Patel, S., et al. (2015). "Synthesis and characterisation of mesoporous bone char obtained by pyrolysis of animal bones, for environmental application." Journal of Environmental Chemical Engineering 3(4): 2368-2377.

Thommes, M., et al. (2015). "Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)." Pure and applied chemistry 87(9-10): 1051-1069.





ตาราง ก1 บันทึกผลค่า pH ถ่านชาร์จากกระดูกไก่

Duck	300		400		500	
pH	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
2	5.90	0.010	5.31	0.010	4.65	0.010
4	8.71	0.015	7.32	0.021	6.02	0.025
6	8.22	0.015	7.22	0.015	6.05	0.010
8	8.95	0.015	7.27	0.015	6.35	0.015
10	9.18	0.010	9.27	0.015	6.45	0.017
12	11.75	0.010	11.77	0.010	11.92	0.006

ตาราง ก2 บันทึกผลค่า pH ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

Chicken	300		400		500	
pH	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
2	6.00	0.015	5.86	0.020	4.28	0.125
4	7.11	0.010	8.74	0.010	9.26	0.015
6	7.31	0.010	8.86	0.010	9.26	0.010
8	7.45	0.010	8.81	0.010	9.36	0.015
10	7.53	0.015	9.06	0.021	9.57	0.025
12	11.73	0.015	11.74	0.031	11.84	0.015

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง ก3 บันทึกผล Kinetic ถ่านชาร์จากกระดูกไก่

Chicken	300		400		500	
Kinetic	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	12.0626	0.3829	17.3259	0.3829	21.5867	0.3829
20	22.4222	3.8285	30.7767	2.5064	40.8021	5.0127
30	35.7894	2.5064	40.8021	2.5064	47.4857	1.4470
40	41.9717	0.3829	47.4021	0.3829	50.2426	0.6308
60	43.2249	0.1447	48.0705	0.2506	51.8300	0.7519
90	42.3059	0.2506	47.4021	0.8057	51.5794	0.5013
120	42.3894	0.8802	47.4857	0.8057	51.9135	0.3829
150	41.8881	0.8802	47.2350	0.1447	50.7439	0.3829
180	41.6375	0.3829	46.9008	0.5217	51.9135	0.5217

ตาราง ก4 บันทึกผล Kinetic ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

Duck	300		400		500	
Kinetic	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	10.7259	2.5064	14.0677	1.4470	18.4955	0.2506
20	21.5867	3.8285	25.7640	2.5064	30.1083	1.6114
30	32.4476	3.8285	34.5362	1.2532	41.5540	0.2506
40	36.7083	0.5217	42.1388	0.1447	47.2350	0.5217
60	42.2223	0.2894	46.0654	0.2506	50.4097	0.7235
90	42.4730	0.3829	47.5692	0.2506	51.3287	0.7519
120	42.3059	0.2506	47.5692	0.6631	51.0781	0.5013
150	41.5540	0.2506	47.5692	0.7519	50.6604	0.2894
180	42.1388	0.1447	46.9008	0.5217	50.8275	0.2506

ตาราง ก5 บันทึกผล Isotherm ถ่านชาร์จากกระดูกไก่

Chicken	300		400		500	
Isotherm	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	8.9895	0.6308	10.3262	0.8682	12.5819	0.5013
40	19.5743	1.7544	21.1616	0.2894	22.7490	0.1447
60	29.8249	0.6631	31.4958	0.3829	32.7490	0.3829
90	40.1464	0.6308	42.6527	0.5788	45.1591	1.1576
120	43.2830	2.5064	46.6248	0.3829	48.2957	2.5064
150	44.5816	1.1302	47.0880	1.2615	48.6753	1.9143
200	44.0169	0.7657	47.3587	3.8285	48.8625	0.7657
250	43.7863	0.6308	47.4622	2.9265	49.3838	1.2532

ตาราง ก6 บันทึกผล Isotherm ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

Duck	300		400		500	
Isotherm	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	8.5717	0.2506	9.2401	0.8057	8.3211	0.5013
40	19.9085	0.3829	21.6629	0.3829	20.7439	0.6308
60	31.3287	0.5013	32.7490	0.3829	32.9996	0.1447
90	39.8122	0.2506	42.5692	0.2506	45.2426	0.6308
120	43.2830	1.2532	45.0374	0.5013	47.4603	3.8285
150	44.4145	0.6308	46.0019	0.2506	48.1741	0.3829
200	45.0194	2.7608	46.1055	0.5217	48.1941	2.5064
250	44.3711	0.7519	46.2091	0.6308	50.0521	2.7033

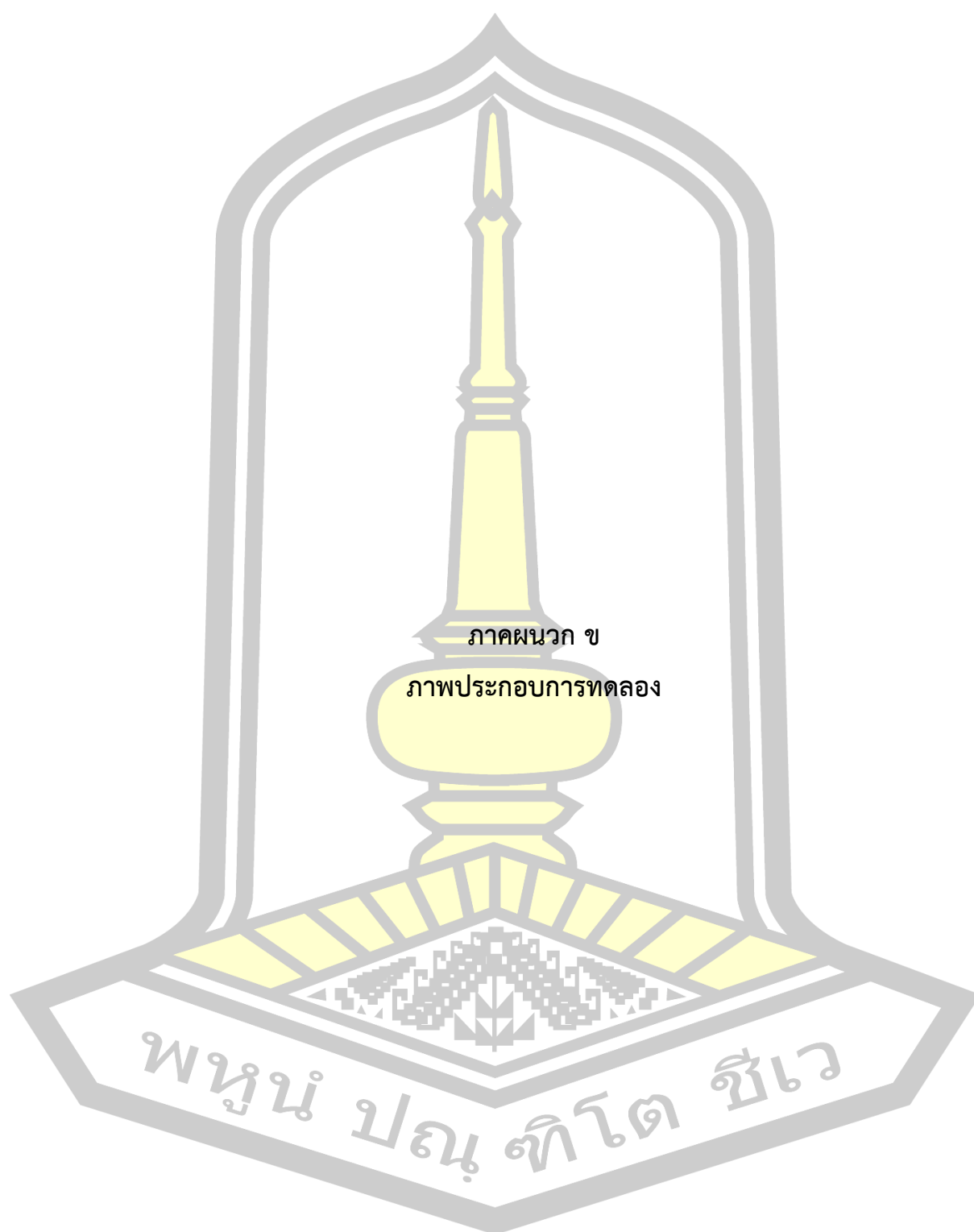
ตาราง ก7 บันทึกผล Dose ถ่านชาร์จากกระดูกไก่

Chicken	300		400		500	
Dose	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	14.5141	1.5314	18.0230	0.7657	20.8635	1.0435
2	27.3079	1.4470	29.9813	0.2894	32.3206	0.5217
3	33.8003	2.8941	36.4180	0.3478	38.2560	0.3478
4	36.0022	0.6266	38.5086	1.0853	40.6390	0.3316
5	36.7218	0.1003	38.6601	0.0579	40.4647	0.1531

ตาราง ก8 บันทึกผล Dose ถ่านชาร์จากกระดูกเป็ด

Duck	300		400		500	
Dose	AVR	STD	AVR	STD	AVR	STD
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	15.3496	1.4470	18.6914	1.0025	21.1977	0.0000
2	28.1433	9.0368	31.3514	0.4283	33.1560	0.0000
3	34.3573	0.9647	37.0864	0.0965	39.0915	0.3478
4	36.5035	0.1253	38.2997	0.7235	40.3883	0.0000
5	36.4211	0.1003	38.3259	0.1003	40.5315	0.1003

พหุ ประถมศึกษา

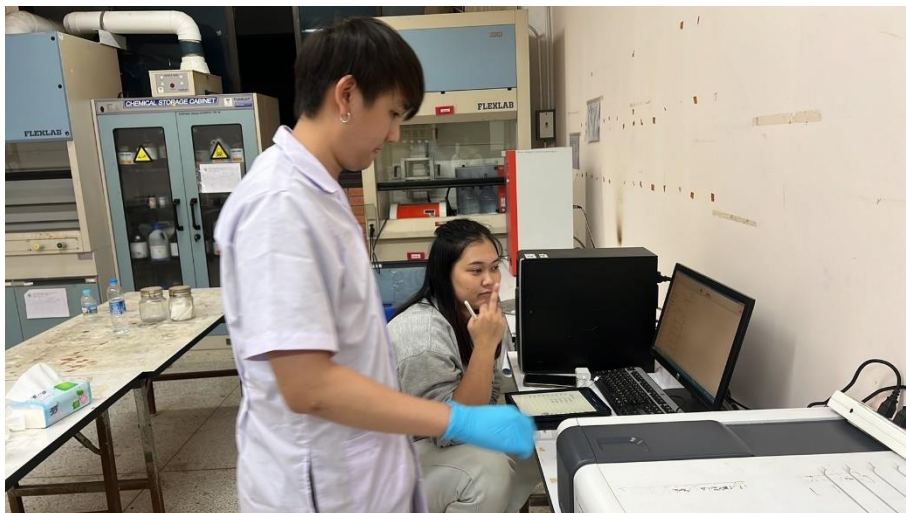




ภาพประกอบ ข1 การกรองถ่านออกจากสารละลายคอปเปอร์



ภาพประกอบ ข2 สารละลายคอปเปอร์ที่ผ่านการกรองถ่านชาร์



ภาพประกอบ ข3 uv spectrophotometer



ภาพประกอบ ข4 การปรับสารละลายคอปเปอร์ซีเตรตสำหรับการทดลอง



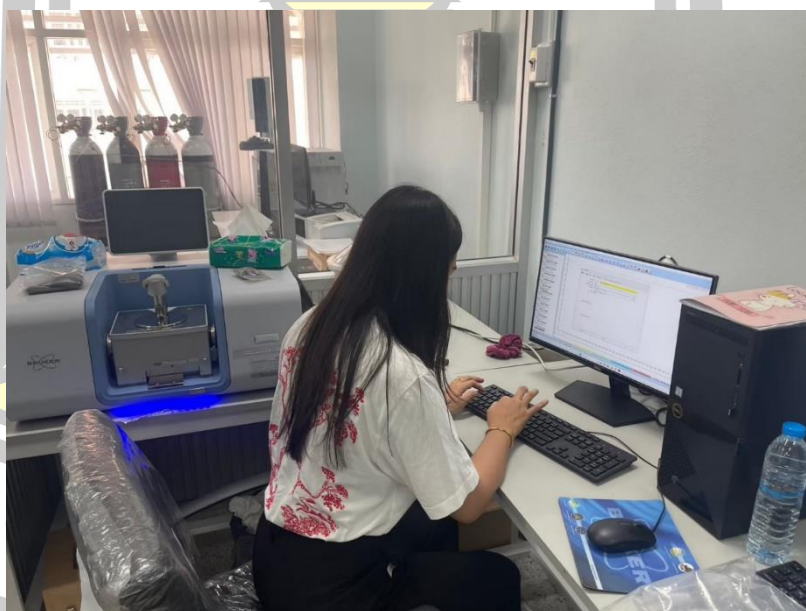
ภาพประกอบ ข5 วัดค่า pH



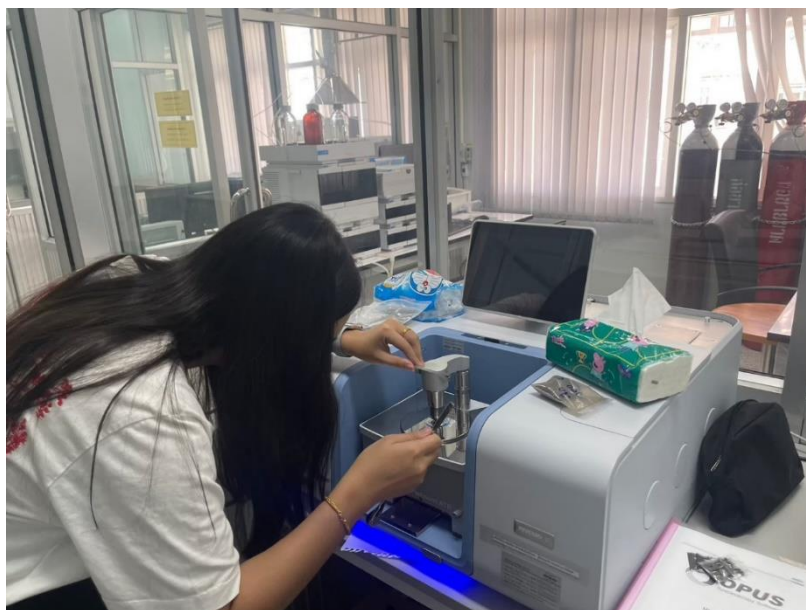
ภาพประกอบ ข6 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างด้วยเทคนิค BET



ภาพประกอบ ข7 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM -EDX



ภาพประกอบ ข8 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างด้วยเทคนิค FTIR



ภาพประกอบ ข9 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างด้วยเทคนิค FTIR



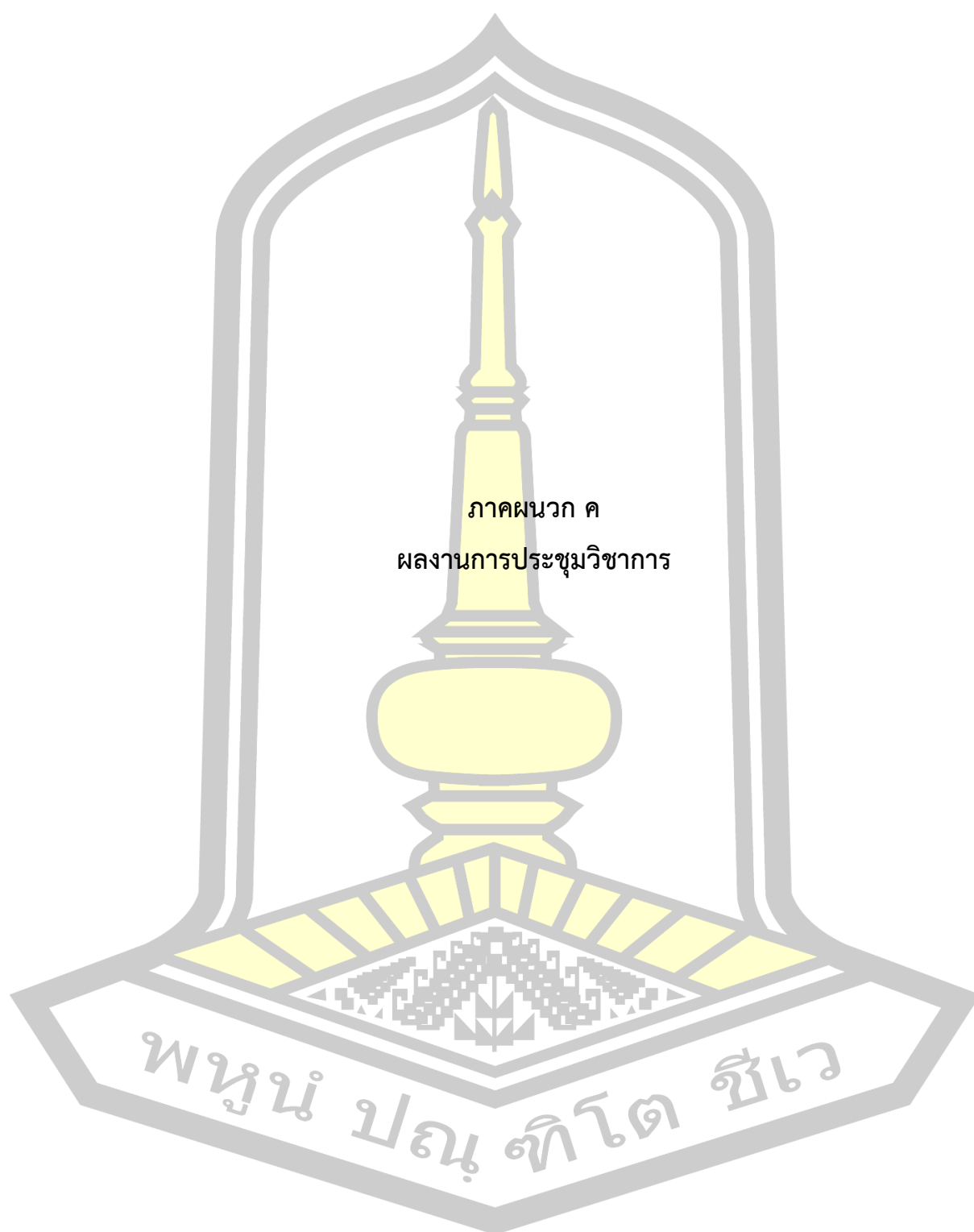
ภาพประกอบ ข10 การเตรียมไนโตรเจนเหลว



ภาพประกอบ ข11 กระบวนการเผาถ่านกระดุก



ภาพประกอบ ข12 กระบวนการเผาถ่านกระดุก





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

EVE06

Characterization of Derived Biochar Through Slow Pyrolysis Process using Chicken and Duck Bones as A Raw Precursor

**Pattaranun Maskhunthod¹, Pornmongkol Tansomros¹,
Poramed Aungthitipan¹ Athicha Janthakot¹, Aitsara Chanthakhot¹,
Surachai Wongcharee^{2*}, Sukanya Hongthong³, Worachate Sangsida⁴,
Chanakran Papayrata⁵ and Wajussakorn Kanjana²**

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

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

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

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

⁵Laboratory Equipment Center of Mahasarakham University

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

Abstract

It is important to note that the effectiveness of biochar can vary based on factors such as feedstock type, pyrolysis conditions, application rates and physical-chemical characteristics. Therefore, it is crucial to consider specific local conditions and conduct research or field trials before widespread adoption. Characterization of derived biochar from a slow pyrolysis process using chicken and duck bones as a raw precursor to review the ability of copper in acid solution for further analysis. The results found that the surface morphology of both biochars was relatively less porous, with Ca, C and O as the major element compositions. The highest percentage of oxygen in duck biochar was about 38%, 33% and 31% for 300 °C, 400 °C and 500 °C, respectively. The stretched vibrations of the alkyne groups ($\text{—C}\equiv\text{C—}$) are approximately 2,999 and 2,915 cm^{-1} . Wide bands at sections from 1,500 to 2,000 cm^{-1} indicate the presence of double bond groups, such as C=O , C=C and C=N are at the peak at 1594 cm^{-1} due to the carbonyl group. Carboxylic acids and esters (saturated aliphatic) for duck and chicken biochar. The isotherm is Type III, this isotherm shape is intermediate between Type I and Type II, and the average porosity is 6–12 nm, and most of the pores are small porosity.

Keywords: bone, biochar, slow pyrolysis, duck, chicken

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ภัทรนันต์ มาศขุนทด
วันเกิด	3 สิงหาคม พ.ศ. 2542
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	19 ม.7 ต.หนองขาม อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ 36140
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ธุรกิจส่วนตัว
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	หจก.เกศรินทร์ค้าไม้และวัสดุก่อสร้าง
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนแก้งคร้อวิทยา จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2561 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย จังหวัดขอนแก่น พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2567 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภัโต ชีเว