

กลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ที่  
ผลิตขึ้นภายในประเทศไทย



ฉัตรชัย จินตกุล

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองเสนอเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

กุมภาพันธ์ 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยพะเยา

กลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้น  
ภายในประเทศไทย



การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองเสนอเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
กุมภาพันธ์ 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยพะเยา

ADSORPTION MECHANISM OF HEAVY METAL IN COAL-FIRED POWER PLANT WASTE  
WATERBY ACTIVATED CARBON IN THAILAND.



CHATCHAI JINTAKUN

An Independent Study in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Master of Engineering in Environmental Engineering

February 2019

Copyright of University of Phayao

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง

เรื่อง

กลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้น  
ภายในประเทศไทย

ของ ฉัตรชัย จินตกุล

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... อาจารย์ที่ปรึกษาการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง

(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กรีธาชาติ)

..... คณบดีวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม

(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กรีธาชาติ)



<b>เรื่อง:</b>	กลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศไทย
<b>ผู้ศึกษาค้นคว้า:</b>	นัตรัชย์ จินตกุล, การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง: วศ.ม. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2561
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา:</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาชาติ
<b>คำสำคัญ</b>	การดูดซับ, โลหะหนัก, ถ่านกัมมันต์

#### บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย และศึกษากลไกการดูดซับประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ได้แก่ สังกะสีและตะกั่ว โดยพบว่าปัจจุบันในประเทศไทยมีผู้ผลิตหลักที่จำหน่ายถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น 4 บริษัท กำลังการผลิตรวมของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และจากไม้ยูคาลิปตัสเท่ากับ 18,300 ตันต่อปี 720 ตันต่อปี และ 480 ตันต่อปี ตามลำดับ มูลค่าของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้อยู่ที่ 60-200 บาทต่อกิโลกรัม ขึ้นอยู่กับเกรดของถ่าน โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ภายในประเทศมีลักษณะสมบัติเบื้องต้นใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในอเมริกา เมื่อนำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านจากกะลามะพร้าว ของบริษัท คาร์โบแกมมา จำกัด (C-1) ถ่านจากกะลามะพร้าว ของบริษัท ซี.โจแกนติค คาร์บอน จำกัด (C-2) ถ่านจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.โจแกนติค คาร์บอน จำกัด (P-1) และถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.โจแกนติค คาร์บอน จำกัด (U-1) มาทำการดูดซับไอออนของโลหะหนัก พบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 98.78% โดยมีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที และสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ 100% โดยมีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที ซึ่งอัตราการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับ 1 และมีกลไกในการดูดซับเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของเรดิช-ปีเตอร์สัน โดยกลไกในการดูดซับนั้นมีความซับซ้อนและมีตัวแปรในการดูดซับมากกว่าสองตัวแปร ทำให้สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 3 ตัวแปร สามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้ดีกว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 2 ตัวแปร

**Title:** ADSORPTION MECHANISM OF HEAVY METAL IN COAL-FIRED POWER PLANT WASTE WATER BY ACTIVATED CARBON IN THAILAND.

**Author:** Chatchai Jintakun, Independent Study: M.Eng. (Environmental Engineering), University of Phayao, 2018

**Advisor:** Associate Professor Torpong Keertachat , D.Eng.

**Keyword** Adsorption, Heavy metal, Activated carbon

#### ABSTRACT

The purpose of this research was to collect secondary data of activated carbon is produced in Thailand including study the adsorption mechanism and efficiency to adsorb the heavy metals in synthetic waste water as same as coal-fired power plants, zinc and lead by domestic activated carbon. The research found that Thailand have 4 producers and distributors of activated carbon. It has product capacity of 18,300 tons per year from coconut shells, 720 tons per year from palm shells and 480 tons per year from eucalyptus wood. The selling price is 60-200 baht per kilogram depend on grade of activated carbon. The basic characteristic of domestic activated carbon as same as the activated carbon was produced in the United States. When use 4 types of activated carbon including activated carbon from coconut Shell by Carbo Karn Co., Ltd. (C-1), activated carbon from coconut shell by C. Gigantic Carbon Co., Ltd. (C-2), activated carbon from palm shell by C. Gigantic Carbon Co., Ltd. (P-1) and activated carbon from eucalyptus wood by C. Gigantic Carbon Co., Ltd. (U-1) to adsorb the zinc ions and lead ions, It was found that all four activated carbon can adsorb zinc ions was 98.78% at 60 minute equilibrium times. And they can adsorb lead ions was 100% at 30 minute equilibrium times. The Kinetic is appear that the adsorption rate of both heavy metal metal was 1<sup>st</sup> order reaction. The mechanism of adsorption is based on the equation of Redlich-Peterson isotherm which shows that the adsorption is related to the chemical and physical adsorption. Three-parameter adsorption equations can describe the adsorption mechanism better than two-parameter adsorption equation.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง กลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศไทย สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย จึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่าน ดังมีรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ต่อพงศ์ กรีธาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้ที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ชี้แนะ ส่งเสริม ตลอดจนความช่วยเหลือต่าง ๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนติยา กรีธาชาติ และ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่ง เพื่อเป็นคณะกรรมการสอบงานวิจัยในครั้งนี้ ทั้งยังให้ข้อคิด รวมถึงหลักการอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ได้อนุเคราะห์ให้เข้าไปเก็บตัวอย่างน้ำเสีย จากกระบวนการผลิต เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด และบริษัท ซี. ใจแกนติก จำกัด ที่ได้ อนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณกระทรวงพลังงาน ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

นอกจากนี้ ขอขอบคุณภรรยาอันเป็นที่รักยิ่ง และทุกคนที่คอยช่วยเหลือในการทดลอง และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยนี้

ฉัตรชัย จินตกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
พลังงาน.....	5
ถ่านหิน.....	8
โลหะหนัก.....	14
การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	17
กระบวนการดูดซับ.....	19
ถ่านกัมมันต์.....	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
รูปแบบการดำเนินการวิจัย.....	38



เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	38
การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล .....	39
บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	42
การศึกษาและรวบรวมข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศไทย .....	42
ผลการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ .....	46
ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic) .....	52
ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) .....	62
บทที่ 5 บทสรุป .....	71
สรุปผลการวิจัย .....	71
ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป .....	74
บรรณานุกรม .....	75
ประวัติผู้วิจัย .....	79



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1	กระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน .....	9
ภาพ 2	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย แยกตามวัตถุดิบที่ผลิต .....	44
ภาพ 3	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศชนิดต่าง ๆ .....	47
ภาพ 4	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศชนิดต่าง ๆ .....	50
ภาพ 5	การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ U-1 .....	57
ภาพ 6	การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ C-2 .....	58
ภาพ 7	การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ P-1 .....	59
ภาพ 8	การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ U-1 .....	60
ภาพ 9	ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ C-1 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation .....	63
ภาพ 10	ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ C-2 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation .....	64
ภาพ 11	ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ P-1 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation .....	65
ภาพ 12	ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ U-1 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation .....	66

## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1	สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบ ของ กฟผ. ปี 2559 .....	7
ตาราง 2	แสดงต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ (ไม่รวมค่าดูแล สิ่งแวดล้อม) .....	7
ตาราง 3	แสดงคุณลักษณะและสารมลพิษในถ่านหินชนิดต่าง ๆ .....	12
ตาราง 4	ธาตุโลหะหนักในถ่านหินโรงไฟฟ้า Figueira ประเทศบราซิล .....	13
ตาราง 5	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักในทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ก.ค. 2560) .....	13
ตาราง 6	รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับประเภทต่าง ๆ .....	23
ตาราง 7	ข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย .....	43
ตาราง 8	ตารางเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดที่ผลิตภายในประเทศไทยและ ชนิดที่ผลิตในต่างประเทศ .....	45
ตาราง 9	ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ .....	48
ตาราง 10	ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ ชนิดต่าง ๆ .....	51
ตาราง 11	ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศไทย ชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method .....	61
ตาราง 12	ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศไทย ชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method .....	62
ตาราง 13	ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการไอโซเทอมและค่า Sum Square of Error ของการดูดซับ ไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation .....	67
ตาราง 14	ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการไอโซเทอมและค่า Sum Square of Error ของการดูดซับ ไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation .....	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานหลักของประเทศไทย คือ พลังงานไฟฟ้า ซึ่งร้อยละ 50 เป็นการนำเข้าจากต่างประเทศ และจากสถิติพบว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2559) ทำให้ประเทศต้องสูญเสียเงินมหาศาลในการนำเข้าพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าภายในประเทศ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาประเทศในอนาคต จากข้อมูลพบว่า โรงไฟฟ้าภายในประเทศไทยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ โดยข้อมูลในตาราง 1 แสดงให้เห็นถึงการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยซึ่งใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานผลิตไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 66 รองลงมาคือถ่านหิน ร้อยละ 23 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนต่อหน่วยของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด พบว่า ถ่านหินมีต้นทุนต่อหน่วยต่ำที่สุดของเชื้อเพลิงที่มีใช้อยู่ในประเทศไทย

ถ่านหินจึงมีบทบาทสำคัญในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Thailand Power Development Plan, PDP) โดยมีการวางแผนลดสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติลง แล้วเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินและเชื้อเพลิงอื่น ๆ ขึ้น (กระทรวงพลังงาน, 2559) แต่การนำถ่านหินมาใช้ นั้น สิ่งที่มาคือปัญหาด้านมลพิษ เนื่องจากถ่านหินมีส่วนประกอบของกำมะถันและโลหะหนัก เช่น ปรอท สารหนู และตะกั่วปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม รวมถึงระบบนิเวศน์ทั้งทางด้าน น้ำ อากาศ และดิน ทำให้เกิดการไม่ยอมรับในสังคม โดยปัจจุบันมีเทคโนโลยีในการดักจับกำมะถันจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน (Clean coal technology) เช่น ระบบอุปกรณ์กำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization, FGD) ทำให้มลพิษจากกำมะถันสามารถควบคุมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย แต่ในส่วนของโลหะหนัก ซึ่งมีความเป็นพิษสูงไม่สามารถสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ นั้น มักปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งของโรงไฟฟ้าจากกระบวนการทำความสะอาดถ่านหินและการชะล้างเถ้า หากสามารถพัฒนาระบบบำบัดเพื่อดักและกักเก็บไม่ให้โลหะหนักเหล่านี้หลุดรอดไปสู่ธรรมชาติได้ การใช้ถ่านหินจะเป็นที่ยอมรับของสังคมมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาด้านพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

เทคโนโลยีในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมีหลากหลาย ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท (พรรรถกร ใจประดับเพชร, 2549) คือ 1) การบำบัดทางเคมี เช่น การปรับสภาพ

กรด-ด่าง การตกตะกอนทางเคมี การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแลกเปลี่ยนประจุ การใช้ไฟฟ้า เป็นต้น และ 2) การบำบัดทางกายภาพ เช่น การกรอง การทำให้แห้ง การดูดซับ หรือการดูดติดผิว การหมุนเหวี่ยง การแยกด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี มีต้นทุนในการดำเนินการที่สูง เนื่องจากปริมาณสารเคมีที่ใช้ การบำบัดทางกายภาพจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าในด้านต้นทุนการดำเนินการ โดยเฉพาะกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุมและบำรุงรักษามีประสิทธิภาพสูงและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ

กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการกำจัดไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง โดยปัจจุบันสารที่นิยมใช้เป็นตัวดูดซับมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เรซิน (Adsorbent Resins) ออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxides) ดินเหนียว (Clays) หรือ อะลูมินา (Activated Alumina) เป็นต้น ซึ่งตัวดูดซับที่มีใช้อย่างแพร่หลายเหล่านี้ ตัวที่มีต้นทุนต่ำ สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง นั่นคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลิตมาจากสารที่มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตามธรรมชาติ เช่น ไม้ กะลามะพร้าว เศษพืชผลทางการเกษตร เป็นต้น นำมากระตุ้นทางเคมี หรือ ทางกายภาพ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นตัวแปรสำคัญของประสิทธิภาพในการดูดซับ ในปัจจุบันมีการผลิตถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมีทั้งที่นำเข้าจากต่างประเทศและที่ผลิตขึ้นในประเทศ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาหลักการการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากจากโรงไฟฟ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศ ซึ่งกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและต้นทุนในการดำเนินการต่ำ จึงเป็นกระบวนการที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบการดักจับโลหะหนักจากน้ำเสียของโรงไฟฟ้าได้ในอนาคต อีกทั้งวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นเศษชีวมวล ซึ่งมีปริมาณมากในประเทศ การศึกษานี้จะเป็นแนวทางให้สามารถพัฒนานำเศษวัสดุเหลือใช้ภาคการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดการเผาทิ้งในที่โล่งซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาหมอกควันทางภาคเหนืออยู่ในปัจจุบันด้วย

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) ที่เกี่ยวข้องกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย
2. เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์
3. เพื่อให้ทราบถึงกลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ

### ขอบเขตของการวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลชนิด ประเภท คุณลักษณะ กำลังการผลิต และราคาของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ
2. ศึกษาสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักแต่ละชนิดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เพื่อนำมาเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง
3. ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด, ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด, ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด ซึ่งทั้งหมดเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
4. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ
5. ศึกษากลไกการดูดซับไอออนสังกะสี และตะกั่วของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่ผลิตขึ้นภายในประเทศในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ (Equilibrium time) จลนศาสตร์การดูดซับ (Kinetic) และสมการไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) โดยใช้สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm), ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm), ไอโซเทอมการดูดซับแบบเรดิช-ปีเตอร์สัน (Redlich-Peterson Isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบซิปลส์ (Sips Isotherm)

### ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบข้อมูลชนิด ประเภท คุณลักษณะ ปริมาณ และราคาของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ
2. ทราบประสิทธิภาพและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่ผลิตภายในประเทศ
3. ทราบกลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ
4. เป็นแนวทางในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียที่เกิดจากโรงไฟฟ้าถ่านหินได้ในอนาคต





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### พลังงาน

พลังงาน (Energy) หมายถึง ความสามารถในการทำงานซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งของที่อาจให้งานได้ ได้แก่ พลังงานหมุนเวียนและพลังงานสิ้นเปลือง เช่น เชื้อเพลิง ความร้อน ไฟฟ้า เป็นต้น ทางด้านวิทยาศาสตร์ พลังงานสามารถวัดได้ โดยกำลังงานที่ใช้ในช่วงเวลาหนึ่งหรือระยะทางหนึ่ง มีค่าเป็น จูล (Joule) ซึ่งพลังงานสามารถเปลี่ยนรูปจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่นได้ โดยกฎการอนุรักษ์พลังงาน ระบุว่าในระบบปิดนั้น พลังงานทั้งหมดที่ประกอบขึ้นจากพลังงานของส่วนย่อย ๆ จะมีค่าคงที่เสมอพลังงานที่ว่านี้ไม่สามารถจะทำให้สูญสลายไปได้ เว้นแต่ว่าจะแปรเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานในรูปแบบอื่น ยกตัวอย่างเช่น เปลี่ยนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเรือน (โดยใช้โซลาร์เซลล์) หรือเปลี่ยนพลังงานสะสมที่มีอยู่ในน้ำที่เก็บไว้ในเขื่อน (พลังงานศักย์) มาเป็นพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนไดนาโม (พลังงานจลน์) ของโรงไฟฟ้า เป็นต้น

#### ประโยชน์ของพลังงาน

พลังงานถือเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ไม่ว่าจะเป็น สัตว์ หรือพืช โดยสัตว์ทั้งหลาย จำเป็นต้องใช้พลังงานในอาหาร สำหรับทำให้เจริญเติบโตและสามารถเคลื่อนไหวได้ ส่วนในระบบนิเวศ พลังงานจากแสงอาทิตย์ จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหารของพืช ทางด้านมนุษย์ พลังงานถือเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวัน ในการสาธารณสุข โภค เช่น การผลิตไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันใช้พลังงานจากน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น ทำให้การค้าพลังงานรูปแบบต่าง ๆ เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นสินค้าสำคัญที่ทำรายได้ให้กับประเทศผู้ผลิต

ในด้านการผลิต พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตทางเกษตรกรรม ตั้งแต่การเพาะปลูก ไปจนกระทั่งการเก็บเกี่ยวผลผลิต ด้านการขนส่งและการสื่อสาร พลังงานเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ระบบทำได้สะดวกรวดเร็วมากขึ้น สิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เครื่องใช้ ในชีวิตประจำวัน ต้องอาศัยพลังงาน เครื่องมือจึงจะทำงานได้ตลอดไปจนถึง ด้านการแพทย์ เช่น การใช้พลังงานจากรังสีเอกซ์เรย์จากแสงเรเซอร์ในการตรวจรักษาและการทำศัลยกรรมโรคต่าง ๆ ล้วนจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น



ด้านความมั่นคงและการทหาร ในปัจจุบัน พลังงานเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญทั้งด้านอาวุธและเทคโนโลยีต่าง ๆ ประเทศที่มีความก้าวหน้าในการผลิตพลังงานเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในทางการทหาร เช่น สหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น เกาหลีเหนือ ได้กลายเป็นประเทศมหาอำนาจจากการพัฒนาด้านอาวุธและพลังงาน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า พลังงานเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในปัจจุบัน และมีความต้องการมากขึ้นจากการเติบโตของประชากรและเศรษฐกิจทั่วโลก การจัดหาพลังงานและการผลิตพลังงานจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มจะเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าซึ่งจำเป็นต่อทุกภาคส่วน

#### การผลิตพลังงานไฟฟ้า

1. แหล่งผลิตไฟฟ้า ไฟฟ้าไม่ใช่แหล่งพลังงาน แต่เป็นเพียงพลังงานแปรรูปที่สะอาดและใช้ได้สะดวกรูปหนึ่งเท่านั้น สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานอื่น ๆ ได้ง่าย เช่น แสงสว่าง เสียง ความร้อน พลังงานกล เป็นต้น ทั้งยังสามารถส่งไปยังระยะทางไกลได้อย่างรวดเร็ว กล่าวคือไฟฟ้ามีความเร็วใกล้เคียงกับแสง ในระยะทาง 100 กิโลเมตร ใช้เวลาเพียง 1 ใน 3,000 วินาที ดังนั้นจึงส่งไปถึงผู้ใช้งานได้ตลอดเวลา สำหรับแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่แท้จริง ก็คือ พลังที่นำมาใช้ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตลอดเวลาหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหยุดหมุน การผลิตไฟฟ้าจะหยุดไปด้วยดังนั้น การที่จะเข้าใจผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้า จึงต้องเข้าใจกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะสิ่งที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะส่งผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมต่างกัน เช่นถ้าใช้ลิกไนต์และน้ำมันเตา จะก่อเกิดมลพิษได้สูงกว่าก๊าซธรรมชาติและถ้าไม่ใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต เช่นใช้พลังงานน้ำ หรือพลังลมหรือเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก

2. ประเภทของโรงไฟฟ้า ประเภทของโรงไฟฟ้า แบ่งตามการใช้เชื้อเพลิง ได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1 ประเภทไม่ใช้เชื้อเพลิง ได้แก่ พลังน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำและพลังงานธรรมชาติจากแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้น ได้แก่ พลังแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น

2.2 ประเภทใช้เชื้อเพลิง ได้แก่ พลังไอน้ำ โดยใช้ความร้อนเผาไหม้ให้กลายเป็นไอน้ำแล้วไอน้ำจะไปหมุนกังหันไอน้ำ พลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ให้กลายเป็นไอน้ำ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมันเตา เป็นต้น พลังงานความร้อน ใช้ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมันมาสันดาป หรือนิวเคลียร์ ทำให้เกิดพลังงานกลต่อไป โรงไฟฟ้าประเทศนี้ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โรงไฟฟ้าดีเซล โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ

ตาราง 1 สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบ ของ กฟผ. ปี 2559

ประเภทเชื้อเพลิง	สะสมเดือนมกราคม-ธันวาคม 2559	
	จำนวน (ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง)	ร้อยละ
ก๊าซธรรมชาติ	124,096.24	66.07
ถ่านหิน	43,216.59	23.01
พลังน้ำ	14,565.21	7.75
น้ำมันเตา	766.75	0.41
น้ำมันดีเซล	217.75	0.12
พลังงานทดแทน	4,840.70	2.58
ซื้อต่างประเทศ	121.79	0.06
<b>รวม</b>	<b>187,825.03</b>	<b>100.00</b>

ที่มา: กระทรวงพลังงาน, 2559

ตาราง 2 แสดงต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ (ไม่รวมค่าดูแลสิ่งแวดล้อม)

ต้นทุน/หน่วยไฟฟ้า	บาท/Kwh
แสงอาทิตย์	12.5
ลม	5.2
ขยะ	3-5
ชีวมวล	3-3.50
นิวเคลียร์	2.79
ถ่านหิน	2.94
พลังงานความร้อนร่วม (Gas Existing)	3.96
พลังงานความร้อนร่วม (Marginal Gas)	4.34
กังหันแก๊ส	13.65

ที่มา: กระทรวงพลังงาน, 2559

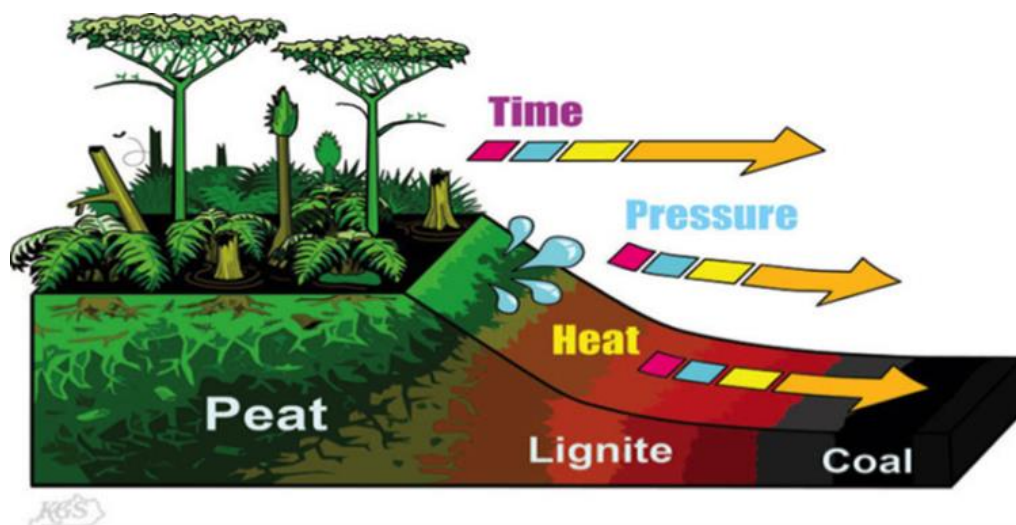
3. โรงไฟฟ้าถ่านหิน เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านหิน หรือลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ด้วยการแปรสภาพพลังงานสะสมของถ่านหินให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งกระบวนการแปรสภาพพลังงานดังกล่าว มีขั้นตอน คือ เปลี่ยนพลังงานสะสมในถ่านหินให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการเผาไหม้หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการสันดาป (Combustion or Oxidation) พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถูกส่งผ่านไปให้กับน้ำทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำ อุณหภูมิและความดันสูง จากนั้นเปลี่ยนพลังงานความร้อนของไอน้ำให้เป็นพลังงานกล โดยใช้ไอน้ำไปหมุนกังหันไอน้ำ แล้วทำการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยให้กังหันไอน้ำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นการสิ้นสุดขั้นตอนการแปรสภาพพลังงาน

## ถ่านหิน

### กระบวนการเกิดถ่านหิน

โดยปกติแล้วซากพืชและซากสัตว์ที่ตายทับถมกันตามธรรมชาติจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาเคมี แต่ในบางครั้งการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติอาจทำให้กระบวนการย่อยสลายเคมีหยุดชะงักลง การมีซากพืชและซากสัตว์ที่ทับถมกันมากขึ้นประกอบกับอาจมีการทรุดตัวของแผ่นดินหรือระดับน้ำซึ่งการยุบตัวลงหรือยกตัวสูงขึ้นของแผ่นดินหรือระดับน้ำนั้นเป็นการปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะสมดุลของเปลือกโลก ต่อมาเมื่อสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยในการเกิดขึ้นของพืชซึ่งมีวัฏจักรเริ่มตั้งแต่การเกิดขึ้นจนล้มตายลงแล้วเกิดการทับถมของซากพืชและซากสัตว์ติดต่อกันเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังมีการพองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก มีตะกอนดินทรายที่ถูกพัดพามากับน้ำทับถมซากพืชและซากสัตว์แล้วจมลงใต้ระดับน้ำอย่างช้า ๆ ภายในเวลาค่อนข้างสั้นประมาณ 5,000 ปี ซากพืชและซากสัตว์เหล่านี้จึงเปลี่ยนเป็นพีต (Peat) และเมื่อตะกอนที่ถูกปิดทับมีปริมาณมากขึ้น พีตจะถูกบีบอัดโดยน้ำหนักของตะกอนที่ทับกับอยู่ ประกอบกับอิทธิพลของความร้อนความดันที่เพิ่มขึ้นตามความลึกที่พีตจมตัวลงและช่วงเวลาของการเกิดถ่านหิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี พีตจึงแปรสภาพไปเป็นถ่านหินซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพีตเป็นกระบวนการแรกของการเกิดถ่านหิน

กระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน (Coalification) เป็นลำดับขั้นตอนในการเกิดถ่านหินโดยเริ่มจากพีตไปเป็นลิกไนต์ (Lignite) ซึ่งใช้ระยะเวลาหลายล้านปี จากนั้นจึงกลายเป็นซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) และบิทูมินัส (Bituminous) ซึ่งมักเกิดขึ้นที่ความลึกไม่เกิน 6 กิโลเมตรจากผิวโลกและอุณหภูมิของการเกิดความร้อนไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส หากความลึกและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมากกว่านี้แล้วบิทูมินัสจะแปรสภาพไปเป็นแอนทราไซต์ (Anthracite) กระบวนการแปรสภาพจากพีตไปเป็นถ่านหินแสดงดังภาพ 1



ภาพ 1 กระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน

ที่มา: <http://www.fossilfuelconnections.org/coal>

#### ประเภทของถ่านหิน

เกณฑ์ในการจำแนกประเภทของถ่านหินนั้นมีความสัมพันธ์กันกับลำดับขั้นของกระบวนการเกิดถ่านหินซึ่งทำให้ถ่านหินแต่ละประเภทมีช่วงเวลาในการเกิดและคุณภาพที่แตกต่างกัน การกำหนดคุณสมบัติที่ใช้ในการจำแนกประเภทของถ่านหินนั้นพิจารณาได้จากปริมาณหรือค่าความเข้มข้นของค่าความร้อน (Calorific Value) ความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) สารระเหย (Volatile matter) และค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ดังนี้

1. พีต เป็นถ่านหินที่เกิดขึ้นในกระบวนการแรกของการเกิดถ่านหิน พีตเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด พีตประกอบด้วยซากพืชและซากสัตว์ซึ่งสลายตัวไปแล้วบางส่วนมีลักษณะเป็นสีน้ำมัน มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณออกซิเจนและน้ำค่อนข้างสูงและใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ให้ค่าความร้อนต่ำและเมื่อเกิดการเผาไหม้ (Combustion) แล้วจะเกิดควันมาก จึงมักใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับครัวเรือนในบางประเทศ

2. ลิกไนต์ เป็นถ่านที่มีวิวัฒนาการมาจากพีต ลิกไนต์จึงยังคงมีซากพืชและซากสัตว์หลงเหลืออยู่เล็กน้อยและอาจมีร่องรอยของเนื้อไม้อยู่บ้าง ลิกไนต์จึงจัดเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ แต่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่าพีต เก็บไว้ไม่ได้นานและสามารถเกิดการเผาไหม้และติดไฟได้เอง (Self-ignition) จึงนิยมใช้ในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม

3. ซับทูปินัส เป็นถ่านหินที่มีลักษณะสีดำล้ายซี่ผิ๊ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ สามารถที่จะแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซได้และเกิดการเผาไหม้ติดไฟได้เองจึงนิยมใช้ในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมเช่นเดียวกันกับลิกไนต์

4. บิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูง จึงใช้เวลาในการแปรสภาพค่อนข้างนาน เนื้อแน่นแข็งและมีสีดำสนิท เป็นมันวาว ไม่มีร่องรอยของเนื้อไม้ มีเถ่าดำ เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วมีควันน้อย แต่ให้ค่าความร้อนสูง จึงเหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นถ่านโค้กและใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก

5. แอนทราไซต์ เป็นถ่านหินที่มีสีดำ เป็นมันวาว มีความแข็งมาก มีรอยแตกเง้าแบบก้นหอย มีค่าคาร์บอนคงที่สูง ความชื้นต่ำ เกิดการเผาไหม้ติดไฟได้ยาก แต่ให้ค่าความร้อนสูงสุดให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวนาน และเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วมีควันน้อยมาก จึงเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุดในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม

#### แหล่งถ่านหินในประเทศไทย

ประเทศไทยมีปริมาณถ่านหินสำรองภายในประเทศมากกว่า 2,000 ล้านตัน ซึ่งเป็นปริมาณสำรองที่ประเมินแล้ว (Measured reserve) ประมาณ 1,000 ล้านตัน แหล่งถ่านหินส่วนใหญ่ของประเทศไทยอยู่ที่ภาคเหนือซึ่งเป็นแหล่งถ่านหินที่มีลำดับชั้นของถ่านหินประเภทถ่านหินลิกไนต์จนถึงบิทูมินัส ส่วนถ่านหินประเภทแอนทราไซต์มีปริมาณอยู่เพียงเล็กน้อยมากและพบได้ในพื้นที่จังหวัดเลยเท่านั้น ส่วนใหญ่แหล่งถ่านหินที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยจากอดีตถึงปัจจุบันนำมาจากเหมืองแม่เมาะ ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยจัดเป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำ ค่าความร้อนไม่สูงมาก นอกจากนี้ยังมีแหล่งถ่านหินที่ดำเนินการผลิตโดยบริษัทเอกชนซึ่งส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพที่ดีกว่า แต่ปัจจุบันปริมาณสำรองถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ของบริษัทเอกชนเหลือน้อยมากและบางแห่งได้หยุดทำการผลิตไปแล้ว ดังนั้นการผลิตถ่านหินจากภาคเอกชนในประเทศจึงมีน้อยมาก ส่วนใหญ่แล้วจึงเป็นการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์ในกิจการของตนเองเท่านั้น ซึ่งแหล่งถ่านหินที่สำคัญของประเทศไทย มีทั้งหมด 7 แหล่ง ได้แก่ แหล่งแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แหล่งแม่ตึบ อำเภองาว จังหวัดลำปาง แหล่งบ้านป่าคา อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน แหล่งบ้านนุ อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน แหล่งเวียงแหง อำเภอเวียงแหง จังหวัดเชียงใหม่ แหล่งกระบี่ อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่ และแหล่งสะบาย้อย อำเภอสะบาย้อย จังหวัดสงขลา

การใช้ถ่านหินลิกไนต์ของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นการใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ส่วนที่เหลือจำนวนเล็กน้อยจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งการเลือกใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านั้นจะคำนึงถึง



ความคุ้มค่าที่มีต่อระบบเศรษฐกิจ สังคม สุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นถ่านหินจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า เนื่องจากมีปริมาณสำรองมากกว่าเชื้อเพลิงอื่น ทำให้มีเสถียรภาพด้านราคา ถึงแม้ว่าถ่านหินจะมีความสะอาดน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ก็มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ทันสมัยโดยใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology) ซึ่งช่วยลดมลพิษจากระบวนการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### โลหะหนักในถ่านหิน

นอกจากมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินแล้ว โลหะหนัก ยังเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อม ซึ่งโดยปกติแล้ว ถ่านหินลิกไนต์ ซับบิทูมินัส และบิทูมินัส จะมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในถ่านหินชนิดลิกไนต์ มีปริมาณโลหะหนักอันตรายมากที่สุด คือ โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว และสารหนู ตามลำดับ และจากผลการศึกษาวิเคราะห์ธาตุโลหะหนักจากหลุมเจาะสำรวจบริเวณแหล่งถ่านหิน 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งแม่ทะ จังหวัดลำปาง แหล่งแม่ละเมา จังหวัดตาก และแหล่งกันตง จังหวัดตรัง จำนวน 12 ตัวอย่าง จากการศึกษาของรูปณี (รูปณี อุ๋นอารีย์กุล, 2543) กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี สามารถสรุปผลการศึกษาได้ คือ ผลการวิเคราะห์พบธาตุโลหะหนักในปริมาณใกล้เคียงกัน ได้แก่ Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, และ Zn และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักกับปริมาณเถ้าถ่านหินของแหล่งถ่านหินทั้ง 3 แหล่ง พบว่า มีความสัมพันธ์ตามลำดับ ดังนี้ Cd, Cr, Cu, Pb และ Zn ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหิน จึงต้องมีการควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้รวมถึงการช่วยลดปริมาณธาตุดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันการถ่ายเทออกสู่สิ่งมีชีวิตภายในห่วงโซ่อาหาร (ณัฐญาภรณ์ ศรีบุญปน, 2558) นอกจากนี้การศึกษาในประเทศไทย ยังมีการวิเคราะห์ธาตุโลหะหนักในเถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้า Figueira ประเทศบราซิล ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย โดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี จำนวน 24 ตัวอย่าง พบธาตุปริมาณน้อย เรียงตามปริมาณความเข้มข้น ดังนี้ Zn, As, Mn, Cr, Pb, Ni, Cu, Mo และ Cd ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 3 แสดงคุณลักษณะและสารมลพิษในถ่านหินชนิดต่าง ๆ

คุณลักษณะ	แอนทราไซต์ (Anthracite)	บิทูมินัส (Bituminous)	ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous)	ลิกไนต์ (Lignite)
คุณลักษณะพื้นฐาน (National Research council of National Academic, 2010)				
เปอร์เซ็นต์การผลัดใบ สหรัฐอเมริกา	น้อยกว่า 0.1%	46.9%	46.3%	6.9%
ค่าความร้อน (Btu/lb)	15	11-15	8-13	4-8
ซัลเฟอร์ (%)	น้อยกว่า 1%	3-10%	น้อยกว่า 1%	น้อยกว่า 1%
สารมลพิษที่เป็นอันตรายในถ่านหิน (lb/10 <sup>9</sup> btu) (USEPA, 2010a)				
สารหนู (Arsenic)	ไม่มีรายงาน	0.5	0.1	0.3
เบริลเลียม (Beryllium)	ไม่มีรายงาน	0.11	0.03	0.2
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มีรายงาน	0.03	0.01	0.06
คลอรีน (Chlorine)	ไม่มีรายงาน	35	2.7	24
โครเมียม (Cromium)	ไม่มีรายงาน	1.1	0.4	2.2
ตะกั่ว (Lead)	ไม่มีรายงาน	0.6	0.2	1.0
แมงกานีส (Manganese)	ไม่มีรายงาน	1.8	1.3	20
ปรอท (Mercury)	ไม่มีรายงาน	0.007	0.006	0.03
นิกเกิล (Nickle)	ไม่มีรายงาน	0.9	0.4	1.2

ที่มา: ฐปณี อุ๋นอารีย์กุล, 2543

**ตาราง 4 ธาตุโลหะหนักในถ้ำถ่านหินโรงไฟฟ้า Figueira ประเทศบราซิล**

ธาตุ	ปริมาณความเข้มข้น (mg/kg)
สังกะสี (Zn)	434-649
แมงกานีส (Mn)	239-445
สารหนู (As)	127-296
โครเมียม (Cr)	74-101
ตะกั่ว (Pb)	66-92
นิกเกิล (Ni)	50-74
ทองแดง (Cu)	31-68
โมลิบดีนัม (Mo)	17-43
แคดเมียม (Cd)	11-28

ที่มา: M. Flues et al., 2013

จากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อทำการวิเคราะห์หาโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ พบว่ามีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ แสดงในตาราง 5 ดังนี้

**ตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักในทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ก.ค. 2560)**

จุดเก็บตัวอย่าง	ผลวิเคราะห์โลหะหนัก โดยเครื่อง AAS		
	Zn	Cu	Pb
น้ำทิ้งจากโรง 4-7	0.223	0.046	0.110
น้ำทิ้งจากโรง 8-13	0.225	0.022	0.052
น้ำทิ้งทั่วไปจากโรง 4-9	0.034	0.021	0.045
น้ำทิ้งทั่วไปจากโรง 10-13	0.043	0.000	0.123
น้ำทิ้งจากเหมือง	0.016	0.000	0.084
เฉลี่ย	0.108	0.018	0.083



## โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23–92 ภายในคาบที่ 4–7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะเป็นมันวาวสะท้อนแสง เหนียว และนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกว่าโลหะอิสระได้หลายรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้ U.S. EPA จึงได้กำหนดโลหะที่มีพิษที่ต้องกำจัดออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง 13 ชนิด ได้แก่ แบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท

### สังกะสี (Zinc, Zn)

1. คุณสมบัติของสังกะสี สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ 2B ในตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 65.37 เลขอะตอม 30 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส สังกะสีมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี ดังนั้นจึงมีการนำเอาสังกะสีมาฉาบผิวเหล็กเพื่อช่วยให้เหล็กคงทนต่อการทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ สังกะสีมีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียวคือ +2 (Howley G.G., 1977) สังกะสีละลายได้ดีในกรดแก่และต่างแก่เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก คือไฮดรอกไซด์ของโลหะประเภทนี้ หากละลายในกรด จะทำให้เกิดแคทไอออน  $Zn^{2+}$  หากละลายในเบสจำทำให้เกิด  $Zn(OH)_2$  จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อย ๆ

2. การปนเปื้อนและผลต่อสิ่งแวดล้อม สังกะสีเป็นธาตุที่ละลายได้ดีในสภาพเป็นกรด สังกะสีสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากทางน้ำทิ้งจากโรงงานถลุงแร่สังกะสีและจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น พบว่า การชะล้างของน้ำฝนจากบ้านที่มุงหลังคาโลหะสังกะสีเคลือบ มีโอกาสปนเปื้อนลงในแหล่งน้ำได้ และจะมีผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำซึ่งความเป็นพิษของสังกะสีนั้นจะไปทำลายเซลล์บริเวณเหงือกของปลา และมีผลต่อการวางไข่และตัวอ่อนของปลา นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา ทำให้การเจริญเติบโตของปลาช้าลงในบริเวณปากแม่น้ำบางแห่ง พบว่าสามารถฆ่าตัวอ่อนของหอยได้ด้วยความเข้มข้น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ระดับความเป็นพิษที่สามารถฆ่าหอยที่เป็นตัวแก่และปลาได้ อาจมีค่าสูงถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีในรูปของสารประกอบเป็นพิษมากกว่าในรูป

ของธาตุหรือไอออนอิสระ ความเป็นพิษของสังกะสีไม่สามารถลดลงได้ด้วยหมู่ SH-(Sulhydrin) เหมือนโลหะชนิดอื่น (พรพรกร ใจประดับเพชร, 2549)

ของเสียจากโรงงานที่มีสังกะสีในปริมาณสูง เช่นเถ้าฟุ้งกระจายหรือเถ้าลอย (Fly ash) อาจนำไปใช้เป็นปุ๋ยสังกะสีได้ในดินที่เป็นกรด (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) อย่างไรก็ตามถ้าวัสดุเหลือใช้มีสังกะสีอยู่มากและแคดเมียมอยู่สูง เช่น กากตะกอนหลายชนิด การลดปริมาณสังกะสีในดินให้น้อยลงอาจทำได้โดยยกระดับพีเอชให้เลย 6.5 ซึ่งเป็นคำแนะนำในการใช้กากตะกอนโดยทั่วไป

3. ความเป็นพิษของสังกะสี สังกะสีเป็นกลุ่มโลหะหนักที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นพิษ ปกติสังกะสีจะมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดอันตราย สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-Compound) เมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) เข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โดยกระบวนการทวีความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Bio Accumulation) (Morton Corn, 1993) รวมทั้งการสัมผัสกับโลหะโดยตรงจากการประกอบกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวัน จึงปรากฏความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์และมนุษย์ อยู่เสมอ ความเป็นพิษต่อพืชของสังกะสีขึ้นอยู่กับชนิดของพืชซึ่งจะทนทานต่อปริมาณสังกะสีได้แตกต่างกัน พืชที่ทนทานต่อสังกะสีได้มาก เนื่องจากพืชสามารถนำสังกะสีไปรวมอยู่ในผนังเซลล์ เมื่อพืชที่ได้รับพิษจากสังกะสีจะสูญเสียคลอโรฟิลล์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ปรากฏอาการแต่จะลดการดูดดึงของฟอสฟอรัส

ตะกั่ว (Lead, Pb)

1. คุณสมบัติของตะกั่ว ตะกั่ว (Lead: Pb) เป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 207.19 อยู่ในหมู่ IV A ของตารางธาตุมีวาเลนซ์ได้หลายระบบ เช่น 1, 2 และ 4 แต่ตะกั่วส่วนมากจะอยู่ในสภาวะวาเลนซ์ 2 ซึ่งเสถียรมากที่สุด สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วยรัศมีอะตอม (โควาเลนต์) 154 พิโกเมตร รัศมีไอออน  $M^{+2}$  เป็น 120 พิโกเมตร ความหนาแน่น 11.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,744 องศาเซลเซียส สารตะกั่วพบได้ทั้งในอากาศ ดิน น้ำ พืช และเครื่องอุปโภค บริโภคในครัวเรือนในชีวิตประจำวันเราใช้ตะกั่วทำแบตเตอรี่รถยนต์ เชื่อมโลหะ ทำท่อโลหะผสม ทำฉากรังสีเอกซ์ ใช้ในอุตสาหกรรมสีและยาฆ่าแมลงบางชนิด ในน้ำธรรมชาติและน้ำประปาที่พบว่ามีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ปริมาณน้อย ตะกั่วพบในน้ำเสียจากโรงงานหล่อหรือหลอมและชุบโลหะ โรงงานแบตเตอรี่เหมือนแร่ สาเหตุของการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและจากฝนที่ชะล้างสารตะกั่วจากอากาศและพื้นดินลงสู่

แหล่งน้ำ สำหรับน้ำประปาอาจมีตะกั่วเจือปนได้จากน้ำดิบที่ใช้ผลิต และจากท่อจ่ายน้ำบริเวณ ข้อต่อที่มีการบัดกรีด้วยตะกั่ว (อรัญ ขวัญปาน, 2550) ค่ามาตรฐานของตะกั่วในน้ำที่มาจาก โรงงานอุตสาหกรรม ทั้งในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ได้กำหนดความเข้มข้นตะกั่วในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานจะต้องมีค่าไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน ในมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินกำหนดความเข้มข้นตะกั่วสูงสุดจะต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

2. การปนเปื้อนและผลต่อสิ่งแวดล้อม ความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำมีความสำคัญ อย่างมากต่อรูปแบบของโลหะหนัก รวมถึงตะกั่วที่พบในน้ำเสีย การเพิ่มความเป็นกรด-ด่าง ให้ น้ำเสียโดยการเติมสารเคมีที่เป็นต่าง เช่น ปูนขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วลดลง ส่งผลให้ตะกั่วตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกั่ว ไฮดรอกไซด์ ( $Pb(OH)_2$ ) ซึ่งสามารถใช้หลักการของการตกตะกอนนี้ในการกำจัดตะกั่วออกจาก น้ำเสียได้ ในน้ำธรรมชาติที่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว ทั้งในแหล่งน้ำจืดและน้ำทะเล พบว่าตะกั่ว สามารถพบได้หลายรูปแบบ เช่น  $PbCO_3$ ,  $Pb(CO_3)_2^{2-}$ ,  $PbCl^+$ ,  $PbOH^+$  และ  $Pb(OH)_2$  เป็นต้น

3. ความเป็นพิษของตะกั่ว ตะกั่วมีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์และสัตว์ ทั้งพิษเฉียบพลัน และพิษสะสม ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ทั้งทางอาหาร น้ำดื่ม ลมหายใจและ ทางผิวหนัง ร่างกายสามารถขับตะกั่วออกมาได้เพียงบางส่วน ส่วนที่เหลือจะสะสมอยู่ใน ร่างกายในตับ ไต และเซลล์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นอันตรายได้ภายหลัง พิษจากตะกั่วทำให้ร่างกายมี ความผิดปกติต่าง ๆ เช่น

3.1 ผลต่อระบบเลือด ตะกั่วจะมีผลต่อการสร้างเม็ดเลือด ทำให้เม็ดเลือดแดงแตก เกิดภาวะโลหิตจาง โลหิตเป็นพิษ

3.2 ผลต่อการทำงานของไต การที่ร่างกายรับสารตะกั่วเข้าไปมาก ๆ จะก่อให้เกิด การทำลายเซลล์ของท่อเล็ก ๆ ของไต ทำให้เนื้อเยื่อไตแข็งกระด้างและเกิดภาวะไตวายในที่สุด

3.3 ผลต่อสมองและระบบประสาท ตะกั่วจะเข้าไปทำลายระบบประสาทส่วนที่มี หน้าที่จดจำเรียนรู้และเกี่ยวข้องกับความรู้สึก อาการทางสมองที่เกิดขึ้นได้แก่ ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย ซึม กระวนกระวาย ความจำเสื่อม ประสาทหลอน ชัก และอัมพาต

3.4 ตะกั่วยังเป็นสารก่อการกลายพันธุ์ และเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง

## การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีปริมาณการใช้ และการผลิตมากขึ้น จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เหมืองแร่ ชุบโลหะ ปิโตรเลียม สี ตลอดจนแบตเตอรี่ ซึ่งล้วนเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักดังกล่าวทั้งสิ้น โดยของเสียที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งเป็นฝุ่นละออง ไอ ตลอดจนน้ำเสีย ส่วนกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีหลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีการใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหลาย ๆ ด้าน ดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีทางเคมี และวิธีทางฟิสิกส์

### การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

เป็นวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเสียโดยเติมสารเคมีลงไป มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดโดยวิธีการอื่นได้ วิธีการบำบัดทางนี้ เช่น

1. การปรับสภาพกรด-ด่าง (pH Adjustment) เป็นการปรับสภาพกรด-ด่างของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของพีเอชไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการบำบัดต่อไปหลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นกรด ก็จะไปปรับสารเคมีประเภทต่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (Lime, CaOH<sub>2</sub>) เป็นต้น

2. การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) เป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อให้อิออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสภาพมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนและน้ำหนักมากขึ้นจมตัวตกลงตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้น สารเคมีที่ใช้เติมมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต (NaCO<sub>2</sub>) โซเดียมซัลไฟด์ สารส้ม เพอริคคอลลอยด์ เพอริคซัลเฟต เป็นต้น

3. การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนท์ (Oxidant) ทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ในน้ำเสีย สารออกซิแดนท์มีหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่างทับทิม และคลอรีน เป็นต้น (พรุษกร ใจประดับเพชร, 2549)

4. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) หลักการคือ ไอออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับไอออนเรซิน (Resin) ซึ่งมีทั้งชนิดไอออนลบ และไอออนบวกโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่น การใช้เรซินที่มีไอออนลบกับน้ำเสียจากการชุบโลหะที่โลหะหนักประเภทประจุบวก เป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างด้วยกรด

5. การใช้ไฟฟ้า (Electro dialysis) อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นเซลล์ไฟฟ้า ภายในมีแผ่นเยื่อกรอง (Membrane) 2 ชนิด ทั้งที่เป็นเยื่อประจุลบและประจุบวก แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้แยกโลหะหนักออกได้ ซึ่งยอมให้ประจุที่เหมือนกันไหลผ่าน แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้แยกโลหะหนักออกได้ เช่น จากการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากการชุบโลหะ การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นต้น

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางฟิสิกส์

เป็นการนำหลักการทางฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีหลายวิธี ดังนี้

1. การกรอง (Filtration) การกรองน้ำอาศัยหลักการอัดน้ำเสียที่มีความดันสูงผ่านวัสดุกรอง ของแข็งที่ไม่สามารถเล็ดลอดช่วงกรองได้จะถูกดักไว้การกรองมีหลายแบบ เช่น การกรองที่มีช่องกรองละเอียด (Micro filtration) การกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก (Ultrafiltration) และการกรองโดยวิธีออสโมซิสกลับ ระบบกรองน้ำมักใช้ ในการแยกสารแขวนลอยที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

2. การทำให้แห้ง (Drying) การทำให้น้ำเสียแห้งนี้อาจใช้แสงแดด หรือให้ความร้อนโดยตรง เพื่อระเหยน้ำออกไปจะได้ของแข็งเหลืออยู่ เช่น การตากตะกอนให้แห้งโดยใช้แสงแดด เป็นต้น

3. การดูดซับหรือการดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์โมเลกุลของของไหลหรือ คอยด์ (Adsorbate) เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็งโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็ง และของไหลนั้น โดยสารดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และยังมีสารดูดซับหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) เบนโทไนต์ (Bentonite) และดินเหนียวกัมมันต์ (Activated Clay) แต่มักนิยมใช้ ถ่านกัมมันต์มากกว่าสารดูดซับอื่น ๆ เพราะกำจัดกลิ่น สี และโลหะหนักในน้ำได้ดี (พรชัยกร ใจประดับเพชร, 2549)

4. การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งน้ำเสียจะถูกเหวี่ยงโดยหมุนด้วยความเร็วสูงของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะถูกเหวี่ยงออกไปรอบนอกวิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง

5. การแยกตัวทำละลาย (Solvent Extraction) หลักการโดยใช้สารสกัด (Extractant) ซึ่งไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายสารที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากนั้นจึงแยกสารสกัดที่มีสารสกัดละลายอยู่ออกไป เช่น โดยวิธีกลั่น เป็นต้น วิธีนี้อาจได้สารละลายอยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่



### กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแข็ง โดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของไหล (ก๊าซ ของเหลว) ระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็งและตัวของไหลเอง มีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ มากมาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและทางด้านสิ่งแวดล้อม การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นกับบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับก๊าซ อนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งสารดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ Activated Carbon, Adsorbent Resins, Ion Exchange Resins, Metal Oxides, Hydroxides and Carbonates, Clays, Activated Alumina และของแข็งอื่น ๆ ที่แขวนลอยอยู่หรือสัมผัสกับน้ำ (พรุษกร ใจประดับเพชร, 2549)

การดูดซับ มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากสามารถใช้ดูดซับโมเลกุลของอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น สี เชื้อโรค และสารพิษต่าง ๆ การเกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์ตามธรรมชาติบน Ion Exchange Resins และ Adsorbent resins เป็นสิ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ และมีบทบาทมากในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากสามารถกำจัดมลสารที่เล็กมาก ๆ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองธรรมดา ถ่านกัมมันต์สามารถใช้ดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของกลิ่น สี และสารอันตรายต่าง ๆ เช่น กรดไขมันของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเพอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งอันเกิดจากการรวมตัวระหว่างการทำโคแอลลูเกชัน จะดูดซับสีซึ่งเกิดจากโมเลกุลและสารประกอบจากปฏิกิริยาของคลอรีนกับไตรฮาโลมีเทน หรือยาฆ่าแมลงที่ถูกดูดซับในเม็ดดินเหนียว เป็นต้น (Frederick W. Pontius, 1990)

#### กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interaction) การดูดซับที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวซึ่งความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี มีดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการใช้หรือว่าถ่ายอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ง่ายและเกิดขึ้นซ้ำเนื่องจากอาศัยการแพร่ของตัวถูกดูดไปบนพื้นผิวของตัวดูด การดูดซับทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนพื้นผิวของตัวดูดซับ แต่เกิดไปทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดซับโดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้

2. การดูดซับแบบทางเคมี จะเกิดการสร้างพันธะทางเคมี เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูดโดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นแล้วจะผันกลับได้ยากกว่า การดูดซับแบบทางเคมี เป็นกระบวนการที่เกิดเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่หรือบริเวณเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง

การดูดซับทางเคมีมีลักษณะสำคัญที่เกิดปฏิกิริยาอันนำมาซึ่งความร้อนที่สูงจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้น อาทิ การหมุนตัวของอิเล็กตรอนการเกิดสนามแม่เหล็กซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและพันธะเคมีจากการรวมตัวของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ และเนื่องจากพันธะทางเคมีนี้ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย (Samuel Denton Faust and Osman M. Aly, 1987)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayered) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับหรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) การกระจายตัว (Dispersion) และการเหนี่ยวนำ (Induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง สำหรับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้นการดูดซับจะเกิดแบบการกระจายตัวหรือเกิดการล้นของอิเล็กตรอนรอบ ๆ นิวเคลียสของอะตอมทำให้พลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้ (พรพรกร ใจประดับเพชร, 2549)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ความสามารถดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดซับ โดยกลไกของการดูดซับภายนอกของสารดูดซับที่ไม่มีโพรงนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับสำหรับสารดูดซับที่มีโพรง อัตราของการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Transport ดังนั้นอัตราการดูดซับจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2. ลักษณะของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำ ของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับสารดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้ คือน้ำ โดยสารดูดซับที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการยากในการดูดซับ ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อย จะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารดูดซับยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซับซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวละลาย

3. อุณหภูมิ การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นความสามารถ ในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (พรورشกร ใจประดับเพชร, 2549)

4. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับเนื่องจากไฮดรอกไซด์ ไอออน และไฮดรอกซิลไอออนสามารถถูกดูดซับอย่างค่อนข้างแข็งแรง การดูดซับไอออนอื่น ๆ จึงมีผลกระทบมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายน้ำของสารต่าง ๆ

5. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ภายนอก และการแพร่ภายใน ซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับ จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ดังนั้น



การแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนสูง จะเกิดฟิล์มบาง ๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วน ในถังดูดซับคือความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็ว จะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

6. เวลาสัมผัส ในกรณีของถังดูดซับแบบคอลัมน์ เวลาสัมผัสจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและอายุการใช้งานของถัง โดยถ้าเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดลดลงแล้วอายุการใช้งานของถังดูดซับแบบคอลัมน์จะนานขึ้น แต่อย่างไรก็ดีเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากช่วงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้ว แทบจะไม่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการดูดซับเลย

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

การดูดซับของสารประกอบที่เป็นของเหลวเข้าไปยังถ่านกัมมันต์ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรู้ถึงอัตราการดูดซับ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบทั้งแบบแบต (Batch reactor) หรือแบบคอลัมน์ รวมไปถึงการทำโมเดลด้วย อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน 4 ขั้นตอนที่เกิดอย่างต่อเนื่องกัน ดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Fluid transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของ ตัวถูกละลายในการของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถเห็นถึงชั้นฟิล์มที่อยู่รอบ ๆ เม็ดคาร์บอน

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลว บาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ทั้งก้อน

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle หรือ Pore Diffusion) เป็นการแพร่ของ โมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในซึ่ง การเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้า

4. การเกาะติดทางกายภาพ (Actual Physical Attachment) เป็นการเคลื่อนที่ของ ของเหลวเข้าสู่สารดูดซับ จนกระทั่งเกิดการแรงทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ได้ค่อนข้าง เร็วกลไกที่เกิดขึ้นมีดังนี้ พันธะไฮโดรเจน (H bonding) แรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals) แรงไฟฟ้าสถิต

### ไอโซเทอมของการดูดซับ

ในการออกแบบระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาทดลอง เพื่อให้ได้ถ่านที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในขั้นการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test) การทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับของถ่านทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ การหาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับ คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity,  $q_e$ ) และค่า ความเข้มข้น ณ จุดสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (Equilibrium concentration,  $C_e$ ) เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้รูปสมการอย่างง่ายแล้วสามารถนำมาวาดกราฟ เพื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ ได้ ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการนำค่าคงที่นั้นมาออกแบบระบบดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับนั้นมีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้คิดค้น โดยมีทั้งแบบ 2 ตัวแปร (Two-Parameter Isotherm) ที่นิยมใช้ คือ ไอโซเทอมแบบแลงด์เมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

นอกจากไอโซเทอมแบบแลงด์เมียร์และฟรอนด์ลิชซึ่งเป็นไอโซเทอมการดูดซับที่นิยม อย่างแพร่หลายแล้ว ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  และ  $C_e$  โดยมีสมมุติฐานและรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้ ประเมินความสัมพันธ์ดังกล่าวได้อย่างแม่นยำมากขึ้น (ต่อพงษ์ กริธาชาติ, 2558) โดยรูปแบบ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบอื่น ๆ แสดงได้ดังตาราง 6

ตาราง 6 รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับประเภทต่าง ๆ

ไอโซเทอม	รูปแบบสมการ	ค่าคงที่
ชนิดที่มีค่าคงที่ 3 ตัวแปร(Three-parameter models)		
Ridlich-Peterson isotherm	$q_e = \frac{AC_e}{1+BC_e^\beta}$	A, B, และ $\beta$
Sips isotherm	$q_e = \frac{q_{m_s} K_S C_e^{m_s}}{1+K_S C_e^{m_s}}$	$q_{m_s}$ , $K_S$ และ $m_s$
Langmuir-Freundlich isotherm	$q_e = \frac{q_{m_{LF}} (K_{LF} C_e)^{m_{LF}}}{1+(K_{LF} C_e)^{m_{LF}}}$	$q_{m_{LF}}$ , $K_{LF}$ และ $m_{LF}$

ตาราง 6 (ต่อ)

ไอโซเทอม	รูปแบบสมการ	ค่าคงที่
Fritz–Schlunder isotherm	$q_e = \frac{q_{m_{FS}} K_{FS} C_e}{1 + q_{m_{FS}} C_e^{m_{FS}}}$	$q_{m_{FS}}$ , $K_{FS}$ และ $m_{FS}$
Radke–Prausnitz isotherm	$q_e = \frac{q_{m_{RPI}} K_{RPI} C_e}{(1 + K_{RPI} C_e)^{m_{RPI}}}$	$q_{m_{RPI}}$ , $K_{RPI}$ และ $m_{RPI}$
	$q_e = \frac{q_{m_{RPII}} K_{RPII} C_e}{1 + K_{RPII} C_e^{m_{RPII}}}$	$q_{m_{RPII}}$ , $K_{RPII}$ และ $m_{RPII}$
	$q_e = \frac{q_{m_{RPIII}} K_{RPIII} C_e}{1 + K_{RPIII} C_e^{m_{RPIII}}}$	$q_{m_{RPIII}}$ , $K_{RPIII}$ และ $m_{RPIII}$
Toth isotherm	$q_e = \frac{q_{m_T} C_e}{(1/K_T + C_e^{m_T})^{1/m_T}}$	$q_{m_T}$ , $K_T$ และ $m_T$
Jossens model	$C_e = \frac{q_e}{H} \exp(Fq_e^p)$	$H$ , $F$ และ $p$
ชนิดที่มีค่าคงที่ 4 ตัวแปร(Four-parameter models)		
Weber–van Vliet model	$C_e = P_1 q_e^{(P_2 q_e^{P_3} + P_4)}$	$P_1$ , $P_2$ , $P_3$ และ $P_4$
Fritz– Schlunder model	$q_e = \frac{AC_e^\alpha}{1 + BC_e^\beta}$	$A$ , $B$ , $\alpha$ และ $\beta$
Baudu model	$q_e = \frac{q_{m0} b_0 C_e^{(1+x+y)}}{1 + b_0 C_e^{(1+x)}}$	$q_{m0}$ , $b_0$ , $x$ และ $y$
ชนิดที่มีค่าคงที่ 5 ตัวแปร(Five-parameter models)		
Fritz– Schlunder model	$q_e = \frac{q_{m_{FS5}} K_1 C_e^{m_1}}{1 + K_2 C_e^{m_2}}$	$q_{m_{FS5}}$ , $K_1$ , $K_2$ , $m_1$ และ $m_2$

ที่มา: ต่อพงศ์ กรีธาชาติ, 2558

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพ โดยมีสมมติฐาน คือ เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมี

จำนวนและตำแหน่งในการดูดซับที่แน่นอน และในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ทั้งนี้ในแต่ละตำแหน่งของการดูดซับค่าความร้อนจะเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน แสดงดังสมการ

$$q_e = \frac{K_L Q^0 C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\dots 1)$$

โดยที่  $q_e$  = ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g)

$K_L$  = ค่าคงที่ของแลงด์เมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม, L/mg)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/L)

$Q^0$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g)

และสามารถเขียนรูปสมการได้เป็น

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L Q^0} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q^0} \quad (\dots 2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชันของเส้นกราฟ (Slope) เท่ากับ  $1/K_L Q^0$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/Q^0$

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ โดยมีสมมติฐาน คือ การดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) (ต่อพงษ์ กริธาชาติ, 2558) ซึ่งเป็นสมการการดูดซับที่ใช้อย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (\dots 3)$$

โดยที่  $q_e$  = ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g)

$K_F$  = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (ลิตรต่อกรัม, L/g)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/L)

$n$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ

จากสมการ สามารถเขียนสมการในรูป Logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\text{Log } q_e = \text{log } K_F + 1/n \text{ log } C_e \quad (\dots 4)$$

เมื่อเขียนการพหุคูณระหว่าง  $\text{log } q_e$  กับ  $\text{log } C_e$  จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง มีค่าความชัน เท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\text{log } K_F$  ของ  $\text{log } q_e$  ที่  $\text{log } C_e = 0$

จากสมการการดูดซับแบบฟรอนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า  $1/n < 1$  แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า  $1/n > 1$  แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่ดี และถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมมีความชันมากแสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูง ๆ และเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นไอโซเทอมชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงเมื่อนำไปใช้ในระบบดูดซับแบบสัมผัส

3. ไอโซเทอมการดูดซับแบบเรดิช-ปีเตอร์สัน (Redlich-Peterson Isotherm) เป็นแบบจำลองปรับปรุงโดยอาศัยสมมติฐานทั้งแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรอนดริช ดังสมการ

$$q_e = \frac{K_{R1} C_e}{1 + K_{R2} C_e^\beta} \quad (\dots 5)$$

โดยที่  $q_e$  = ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g)  
 $K_{R1}$  = ค่าคงที่ของเรดิช-ปีเตอร์สัน (ลิตรต่อกรัม, L/g)  
 $K_{R2}$  = ค่าคงที่ของเรดิช-ปีเตอร์สัน (ลิตรต่อมิลลิกรัม, L/mg)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/L)  
 $\beta$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ

โดยค่าคงที่  $\beta$  มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเมื่อมีค่าเข้าใกล้ 1 สมการจะเปลี่ยนเป็นแบบจำลองของแลงเมียร์ (Zümriye Aksu, 2001)

4. ไอโซเทอมการดูดซับแบบชิปส์ (Sips Isotherm) ชิปส์ (Sips) เสนอแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบใหม่โดยเป็นแบบจำลองที่ผสมลักษณะแบบจำลองสมดุลดูดซับระหว่างแลงเมียร์และฟรอนดริช ซึ่งแสดงถึงระบบที่โมเลกุลตัวดูดซับหนึ่งตัวสามารถดูดซับได้มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง ซึ่งมีตัวแปร  $m_s$  เป็นตัวบ่งบอก ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{K_{s1} K_{s2} C_e^{m_s}}{1 + K_{s2} C_e^{m_s}} \quad (\dots 6)$$

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณสูงสุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวของตัวดูดซับ (mg/g)

$K_{s1}$  = ค่าคงที่ของซีปส์ (L/g)

$K_{s2}$  = ค่าคงที่ของซีปส์ (L/mg)

$m_s$  = ดัชนีชี้กำลังของซีปส์

ซึ่งที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง เป็นไปตามสมการของฟรุนดลิช ส่วนที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับสูง ความสามารถในการดูดซับจะเป็นแบบดูดซับชั้นเดียว เป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ (Mirjana Brdar et al., 2012)

### ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพการดูดซับให้มากขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ โครงสร้างที่มีลักษณะพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และอิเล็กทรอนิกส์ระอุอยู่บนผิวและรูพรุนเหล่านั้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ กระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์เคมีและยา น้ำดื่ม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดกลิ่นและฟอกสี นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลภาวะต่าง ๆ โดยถ่านกัมมันต์ผลิตขึ้นจากการเผา (Carbonization) จากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ในการผลิตอาจเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ผลิตมีอยู่หลายชนิด แต่มักจะพิจารณาจากอินทรีย์วัตถุซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นพวกเซลลูโลส จากพืชหรือต้นไม้โดยตรง เช่น ไม้ชนิดต่าง ๆ หรือในรูปของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรืออุตสาหกรรม เช่น ชานอ้อย แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง ฯลฯ

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าสารดูดซับอื่น ๆ เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) จึงทำให้ดูดซับสารมากกว่า (พรุษกร ใจประดับเพชร, 2549) ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะมากได้ การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมาก ๆ มาเกาะติดที่ผิวได้



ดังนั้นพื้นที่ผิวสูงจึงมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive Capacity) สูงตามไปด้วย การวัดพื้นที่ผิวของคาร์บอนกระทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกคาร์บอนดูดซับไว้ วิธีวัดสมรรถนะของคาร์บอนอาจกระทำได้โดยการวัดไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของคาร์บอน

#### คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

1. ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของเบนซีนริง (Benzene Ring) หรือกลุ่มของอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (Plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม ดิสเพลสเมนต์ (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) จะเกิดง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้างที่จุดนี้ได้ง่าย

2. โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องระหว่างผลึกของคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้น ไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี (M. M. Dubinin, 1966) ความพรุนสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

2.1 มาโครพอร์ (Macropores) ทั่วไปมาโครพอร์ในถ่านกัมมันต์ที่พบมีรัศมีอยู่ในช่วง 5,000–20,000 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าระหว่าง 0.2–0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวมีค่า 0.5–2.0 ตารางเมตรต่อกรัม

2.2 ทรานซิชันนอลพอร์ (Transitional pores) รัศมีของทรานซิชันนอลพอร์มีค่าอยู่ในช่วง 40–200 อังสตรอม โมเลกุลเดี่ยว และโพลีโมเลกุล (Polymolecule) สามารถถูกดูดซับได้ที่พื้นที่ผิวบริเวณนี้ ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02–0.10 มิลลิลิตรต่อกรัม พื้นที่ผิวบริเวณนี้มีค่าอยู่ในช่วง 20–70 ตารางเมตรต่อกรัม

2.3 ไมโครพอร์ (Micropores) รัศมีของไมโครพอร์มีค่าน้อยกว่า 20 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าระหว่าง 0.15–0.50 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวมีค่าน้อยที่สุดร้อยละ 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ไมโครพอร์เปิดโดยตรงสู่ผิวภายนอกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ โดยที่ทรานซิทชันนอลพอร์จะแตกสาขาออกมาจากไมโครพอร์ และในรูปแบบเดียวกัน ไมโครพอร์แตกสาขาออกจากทรานซิทชันนอลพอร์ ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรความพรุนสูงที่สุด

3. โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอนไนซ์ เซชันในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนจะถูกกำจัดออกไปในรูปก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรงและสร้างหมู่ฟังก์ชันัลขึ้นมาแทนความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น ๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยในการเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงแหวนอะโรมาติก ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400–500 องศาเซลเซียส และกลายเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนียและซัลเฟอร์ออกมาจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพก๊าซหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันัลต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ กลุ่มของฟังก์ชันนอลที่พบบนพื้นผิวของคาร์บอนประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactone, Fluroscein Type Lactone, Carboxylic Acid Anhydride และ Cyclic



Peroxide ซึ่งจากคุณสมบัติเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้ในการเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนที่มีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Polar Organic) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีออกซิเจนพื้นผิวสามารถใช้ในการกำจัดโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีผลกระทบอย่างมากต่อความจุของการดูดซับ เช่น หมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอกซิล (Carboxylic group) จะมีความจุในการดูดซับฟีนอลลดลง เป็นต้น (พรพรกร ใจประดับเพชร, 2549)

#### การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์จะได้จากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านหิน ไม้ เปลือกไม้ แกลบ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด กากกาแฟ ของเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษ ชี้อ้อย (J. W. Hassler, 1967) แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ เตรียมวัตถุดิบ การเผาให้เป็นถ่าน หรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น หรือแอคติเวชัน (Activation)

1. การเตรียมวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์ หลังจากนั้นทำการอบหรือตากวัตถุดิบให้แห้ง (Dehydration) แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตาหรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์แล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป

2. การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน หรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ขั้นตอนนี้เป็น การนำวัตถุดิบมาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย หรือการเผาแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ถูกไล่ออกมาในรูปก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในรูปของเซลล์ูลอส เฮมิเซลล์ูลอส และลิกนิน จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ระยะเวลาในการเผาองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ

เมื่อมีการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนที่มีอยู่ก็จะสลายไป ซึ่งการสลายจะเกิดขึ้นคือ วัตถุดิบที่มีโครงสร้างหลักเป็นเซลลูโลส ( $C_6H_{10}O_5$ ) เมื่อถูกเผาในกระบวนการไพโรไลซิส

คาร์บอนโนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนโนเซชัน ควรจะมีลักษณะดังต่อไปนี้ คือ มีสีดำสลด (uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอน การคาร์บอนโนเซชันนี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำมากเพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400–600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

3. การกระตุ้น หรือแอคติเวชัน (Activation) การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น ซึ่งวัตถุประสงค์ของการกระตุ้นถ่านคาร์บอนเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น และเป็นการทำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active centers)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ วิธีกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี

3.1 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่าง ๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Saturated Steam) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อนปฏิกิริยา การกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อ

คุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (J. W. Hassler, 1967)

ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง หลังจากกระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์แล้วสามารถนำไปใช้งานได้ทันที เพราะไม่มีปัญหาในการล้างสารเคมีที่เหลือตกค้างส่วนข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี (700–1,200 องศาเซลเซียส) จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

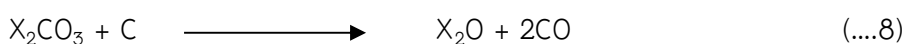
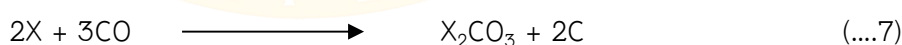
3.2 วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้น (Activation agent) ผสมคลุกเคล้าเข้ากับวัตถุดิบ และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ผสมวัตถุดิบกับสารเคมีโดยตรงแล้วให้ความร้อนแบบไพโรไลซิส เพื่อทำให้เป็นผลึกถ่าน พร้อม ๆ กับการกระตุ้น ส่วนแบบที่ 2 ทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านก่อนเติมสารเคมี แล้วจึงทำให้ความร้อนเพื่อทำการกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง การกระตุ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ชนิดของสารกระตุ้น รวมถึงวิธีการอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโปแตสเซียมหรือโซเดียม เช่น โปแตสเซียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมซัลไฟด์ และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมสารประกอบที่มีไฮดรอกไซด์ของแก๊สไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

ปฏิกิริยาที่เกิดในการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม มีดังนี้



โดยที่ X คือ ไฮดรอกไซด์ของโปแตสเซียม ( $K^+$ ) หรือ ไฮดรอกไซด์ของโซเดียม ( $Na^+$ )

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือ ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมาก (400–600 องศาเซลเซียส) สารเคมีแทรกซึมได้ทั่วถึง ได้รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ค่อนข้างใหญ่

แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน แต่สำหรับเกลือแกง เป็นสารที่มีคุณสมบัติดูน้ำได้ มีราคาถูก หาซื้อได้ตามท้องตลาด และไม่ก่อให้เกิดพิษตกค้างหลังผ่านการกระตุ้น (พรพรกร ใจประดับเพชร, 2549)

ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

1. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอ

1.1 ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ

1.2 ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ ๆ

1.3 กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เป็นต้น

1.4 ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิกรณ์ให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon bed)

2. ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

2.1 ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

2.2 ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เครื่องดื่ม แอลกอฮอล์

2.3 ใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมเคมีและยา เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อย ๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮดรอกซิลอะมิโนฟีนีลาโซนิคแอซิด (Hydroxyl Aminophenylarsonic Acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้อ อามิบาและพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ

2.4 ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น

2.5 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst-carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นต้น

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) สามารถผลิตได้จากวัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดี โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ คือ พื้นที่ผิว โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสามารถทำได้โดยการกระตุ้น ทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมี ดังจะเห็นจากงานวิจัยของ I.A. Aguayo-Villarreal ซึ่งศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกของพีแคนนัท (Pecan nut shell, *Carya illinoensis*) โดยการกระตุ้นทางเคมี ด้วยสารละลายโปแตสเซียม คลอไรด์ (KCl) และกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้นจาก 331 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 808 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อนำมาทำการทดลองดูดซับ ไอออนของโลหะหนักสี่ชนิด คือ สังกะสี (Zn<sup>2+</sup>) แคดเมียม (Cd<sup>2+</sup>) นิกเกิล (Ni<sup>2+</sup>) และทองแดง (Cu<sup>2+</sup>) พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้นถึง 1,214% (I.A. Aguayo-Villarreal et al., 2017) สอดคล้องกับงานวิจัยของมานัด แก้วถาวร ทำการศึกษาเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้สารกระตุ้น 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยสารทั้งสามชนิดนั้นจะทำให้ถ่านมีคุณสมบัติในการดูดซับดีขึ้นกว่าการใช้ถ่านธรรมดา การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการการกระตุ้นจาก 30-120 นาที จะทำให้ถ่านที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มขึ้น แต่ร้อยละของผลผลิตจะลดลงประมาณ 0.6-5.6 และเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การศึกษาขนาดกะลาพบว่าขนาดกะลาที่เล็กลงจะทำให้ถ่านมีคุณสมบัติในการดูดซับดีขึ้น แต่ค่าร้อยละผลผลิตลดลง ซึ่งอัตราส่วนของสารกระตุ้นคือ ปริมาณกะลามะพร้าวต่อซิงค์คลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ ที่เหมาะสม คือ 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้นนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800-900 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาการใช้สารกระตุ้น พบว่าโซเดียมคลอไรด์เป็นสารกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าซิงค์คลอไรด์ แต่ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นที่ดีแต่เป็นพิษต้องล้างออกก่อนนำไปใช้งาน เมื่อใช้แล้วจึงต้องพยายามนำกลับมาใช้ใหม่ (มานัด แก้วถาวร, 2537) และดังการทดลองของ สุโรชินี สกุลดวงดี ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ และการทดสอบความชอบในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม คือความเข้มข้นของวัตถุดิบต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์ คือ 1:3 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที โดยมีค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 49.18 ค่าพื้นที่ผิว 2168 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 1565 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีขนาดรูพรุน 2-10 นาโนเมตร แล้วเมื่อนำทดสอบการดูดซับกับตัวทำละลายอินทรีย์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่า



ตัวทำละลายมีขี้ว นอกจากนั้นเศษวัสดุเหลือใช้ที่ไม่มีประโยชน์สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้เช่นกัน (สุโรชินี สกุลดวงดี, 2545) ส่วนการศึกษาของ Antonio Nieto-Márquez ได้ศึกษาการนำเศษยางรถยนต์เก่ามาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักสามชนิด คือ ตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ), โครเมียม ( $Cr^{3+}$ ) และแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ซึ่งพบว่าสามารถดูดซับไอออนของตะกั่วได้ดี และเมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นพบว่าทำให้พื้นที่ผิวและประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น แต่ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์จะสามารถผลิตได้จากเศษวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ แต่ประสิทธิภาพยังเป็นรองถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักสูง (Antonio Nieto-Márquez et al., 2017) ดั้งการศึกษาของ Edidiong Asuquo ที่ได้นำถ่านกัมมันต์ที่มีขายในท้องตลาดมาทดลองดูดซับไอออนของตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) และแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) พบว่าสามารถดูดซับไอออนของแคดเมียมได้ถึง 17.23 มิลลิกรัมต่อกรัม และไอออนของตะกั่วได้ 16.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นในแง่ของการนำไปใช้จริงในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีไอออนของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่จึงควรพิจารณาในการใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีขายตามท้องตลาดและหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง (Edidiong Asuquo et al., 2017)

ถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะได้สูง ในส่วนของสังกะสีและตะกั่ว ก็เช่นเดียวกัน มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาการดูดซับไอออนของสังกะสี และตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ เช่น งานวิจัยของ อีระ วงศ์เนตร ซึ่งศึกษาการดูดซับสารปนเปื้อนที่เป็นโลหะหนักบางชนิดในสถานะสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง โดยศึกษาผลของค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก และไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้เทคนิคการดูดซับแบบแบท ผลการวิจัยพบว่า สภาวะพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออนโลหะทองแดง ( $Cu^{2+}$ ), เหล็ก ( $Fe^{3+}$ ), โครเมียม ( $Cr^{3+}$ ), แคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ), แมงกานีส ( $Mn^{2+}$ ) และนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ได้แก่ พีเอช 5, 4, 6, 5, 6 และ 5 ตามลำดับ โดยการดูดซับโลหะหนักทุกตัวมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลในระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที และพบว่าพฤติกรรมดูดซับโลหะหนักทุกตัวเป็นไปตามทั้งไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่า  $r^2$  มีค่ามากกว่า 0.90 โดยค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ดีกว่า ยกเว้นโลหะเหล็กที่เป็นแบบฟรุนดลิชมากกว่า ความจุของการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (โมโนเลเยอร์,  $q_m$ ) สำหรับโลหะทองแดง เหล็ก โครเมียม แคดเมียม แมงกานีส และนิกเกิล เท่ากับ 0.376, 0.064, 0.706, 0.567, 0.443 และ 0.720 มิลลิโมลต่อกรัมของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยวิธี การกระตุ้นทางกายภาพมีค่าเท่ากับ 0.373, 0.053, 0.734,



0.553, 0.459 และ 0.668 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ (ธีระ วงศ์เนตร, 2559) และงานวิจัยของ อธิชัย นพแก้ว ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกักพบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และปรอท คือ พีเอชเท่ากับ 4 เวลาสัมผัส 15 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ และสำหรับน้ำชะมูลฝอย คือ พีเอชเดิมของน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 เวลาสัมผัส 15 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์นอกจากจะกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยแล้วยังกำจัดซีโอติ และสีจากน้ำชะมูลฝอยอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า การกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยมีประสิทธิภาพดีกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อมีปริมาตรน้ำจากที่ผ่านการบำบัดเท่ากัน โดยมีประสิทธิภาพรวมประมาณร้อยละ 90 และร้อยละ 70 สำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยและน้ำเสียสังเคราะห์ตามลำดับ (อธิชัย นพแก้ว, 2539) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ลลิตา นิตศนจากรุกุล ซึ่งได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุติดต่อโซเดียมคลอไรด์ 1:0 ซึ่งให้ค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 567 และ 532 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการแช่วัตถุติดด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบแห้งแล้วทำการเผาและกระตุ้นเพียงพอที่จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการศึกษาศึกษาที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว พบว่าที่พีเอชตั้งแต่ 4 ขึ้นไปถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วสูงกว่าร้อยละ 90 ที่ผลของเวลาสัมผัส 10 นาที และการทดลองแบบต่อเนื่องได้เลือกใช้ถ่านเปลือกทุเรียนบรรจุในชุดถังดูดซับแบบแห้งโดยทำการบ่อน้ำเสียแบบไหลลงอย่างต่อเนื่อง และทำการเก็บน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางปลายท่อจนกระทั่งถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนที่ขึ้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 94.01, 58.85, 50.98 และ 47.06 BV ตามลำดับ จากการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่าถ่านเปลือกทุเรียนมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปใช้งานได้ทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม (ลลิตา นิตศนจากรุกุล, 2544) และงานวิจัยของ สุจรรย์ คุษเสงี่ยม ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว ซึ่งการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาด

ทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 532.29 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 492.42 ตารางเมตรต่อกรัม การทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 8.37 และ 5.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแบ่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 2.45, 2.57, 2.69, และ 2.81 มิลลิกรัมต่อกรัม และดูดซับปรอทได้ 2.21, 2.45, 2.45 และ 2.70 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.824 และ 9.830 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 486.45 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิว 385.9073 ตารางเมตรต่อกรัม และการทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดสอบ ไอโซเทอม การดูดซับแบบฟรุนดลิชพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อกรัม การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแบ่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.83, 3.83, 3.75 และ 3.88 มิลลิกรัมต่อกรัม และดูดซับปรอทได้ 3.61, 3.83, 3.61 และ 3.72 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.853 และ 3.865 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (สุจันีย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### รูปแบบการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

#### เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride,  $ZnCl_2$ ) (M.W. = 136.28)
2. เลดไนเตรต (Lead(II) nitrate,  $Pb(NO_3)_2$ ) (M.W. = 331.21)
3. กรดไนตริก (Nitric acid,  $HNO_3$ ) (M.W. = 63.01)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) (M.W. = 40.00)
3. ถ่านกัมมันต์
  - 3.1 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด (C-1)
  - 3.2 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (C-2)
  - 3.3 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (P-1)
  - 3.4 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (U-1)
5. น้ำดีไอไนซ์ (Deionized water)
6. เครื่องเขย่า (shaker)
7. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)
8. เครื่องชั่งแบบดิจิทัล (Digital weight scale) แบบละเอียด 4 ตำแหน่ง
9. ไซลิ่งฟิลเตอร์ (Syringe filter) ขนาด 0.45 ไมครอน
10. ตู้อบ (Oven)
11. ตู้อบลดความชื้น (Incubator)
12. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
13. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic adsorption spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น ASC-6880

## การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

### การเตรียมสารละลาย

1. เตรียมสารละลายไอออนสังกะสีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.1 ชั่งซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) 0.0104 กรัม ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

1.2 เติมน้ำกลั่นกรดไนตริกเข้มข้น 0.5 โมลลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

1.3 นำไปละลายด้วยน้ำ deionized แล้วเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร

1.4 ปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลลาร์ จนได้ pH อยู่

ในช่วง 6.5–7.5

1.5 ปรับปริมาตรด้วยน้ำ deionized จนถึงขีดปริมาตร

2. เตรียมสารละลายไอออนตะกั่วความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.1 ชั่งเลดไนเตรต ( $Pb(NO_3)_2$ ) 0.0080 กรัม ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2.2 เติมน้ำกลั่นกรดไนตริกเข้มข้น 0.5 โมลลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

2.3 นำไปละลายด้วยน้ำ deionized แล้วเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร

2.4 ปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลลาร์ จนได้ pH อยู่

ในช่วง 6.5–7.5

2.5 ปรับปริมาตรด้วยน้ำ deionized จนถึงขีดปริมาตร

3. เตรียมสารละลายไอออนตะกั่วความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1 ตวงสารละลายเลดไนเตรต ( $Pb(NO_3)_2$ ) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร

3.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำ deionized จนถึงขีดปริมาตร

4. เตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.5 โมลลาร์

4.1 ใช้ปิเปตขนาด 50 มิลลิลิตร ดูดกรดไนตริกเข้มข้น 65 % w/w ปริมาตร 32 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่เล็กน้อย

4.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำ deionized จนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร

5. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลลาร์

5.1 ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม

5.2 นำไปละลายด้วยน้ำ deionized แล้วปรับให้มีปริมาตร 1 ลิตร

### การเตรียมถ่านกัมมันต์

1. นำถ่านกัมมันต์มาล้างด้วยน้ำ deionized เพื่อกำจัดผงถ่านขนาดเล็กลง

2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำไปไว้ในตู้อบลดความชื้น (Incubator) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

1. ตวงสารละลายไอออนสังกะสีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวด Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 27 ขวด

2. เติมถ่านกัมมันต์ชนิดที่ 1 ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวด Flask ทั้ง 27 ขวด

3. นำไปเขย่า ด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที

4. นำขวด Flask ออกไปกรองเอาผงถ่านออกที่เวลา 3 นาที จำนวน 3 ขวด ด้วยไซลิงค์ฟิลเตอร์ ทำเช่นเดียวกันที่เวลา 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที ตามลำดับ

5. นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดหาปริมาณไอออนของสังกะสีที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา แล้วนำมาพลอตกราฟเพื่อหาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1.1–1.5 กับสารละลายไอออนตะกั่วความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1.1–1.6 กับถ่านกัมมันต์อีก 3 ชนิด

8. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อหาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของถ่านแต่ละชนิด และวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของของสังกะสี และตะกั่ว ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

1. ตวงสารละลายไอออนสังกะสีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวด Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 24 ขวด

2. เติมถ่านกัมมันต์ชนิดที่ 1 ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0 และ 2.0 กรัม ลงในขวด Flask อย่างละ 3 ขวด

3. นำไปเขย่า ด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับตามระยะเวลาที่ได้จากขั้นตอนที่ 1

4. นำขวด Flask ออกไปกรองเอาผงถ่านออก

5. นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดหาปริมาณไอออนของสังกะสีที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หาค่าเฉลี่ยในแต่ละปริมาณน้ำหนักถ่านกัมมันต์

6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2.1–2.5 กับสารละลายไอออนตะกั่วเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2.1–2.6 กับถ่านกัมมันต์อีก 3 ชนิด

8. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อหาสมการไอโซเทอมที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการดูดซับ โดยใช้วิธี Non-linear equation และกระบวนการ Sum the square of error (ERRSQ)





## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ในทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศไทย ทั้งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ปริมาณการผลิต กระบวนการผลิต รวมไปถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศ และได้ทำการศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ สังกะสี (Zinc, Zn) และตะกั่ว (Lead, Pb) ซึ่งเป็นโลหะหนักที่พบมากในน้ำเสียจากการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินในประเทศไทย โดยเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการวิจัย ซึ่งได้ผลการวิจัย ดังนี้

#### การศึกษาและรวบรวมข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศไทย

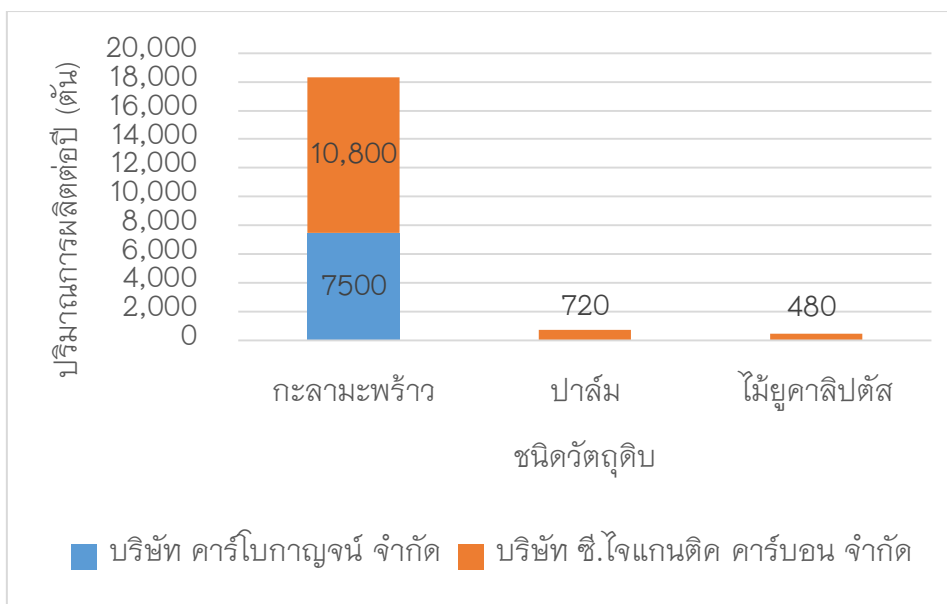
ข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

จากข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า มีโรงงานที่จดทะเบียนเป็นผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น 11 โรง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2561) แต่จากการติดต่อสอบถามกับผู้ประกอบการพบว่า ข้อมูลที่ได้ยังไม่เป็นปัจจุบัน บางโรงงานมีการประกอบกิจการประเภทอื่น แต่ยังไม่ได้เปลี่ยนแปลงข้อมูล บางโรงงานเป็นผู้จำหน่ายเท่านั้น และบางโรงงานรับแค่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาบำบัด (Recovery) ซึ่งเมื่อรวบรวมข้อมูลจึงได้ข้อสรุปว่า ปัจจุบันในประเทศไทยมีผู้ผลิตและจำหน่ายถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น 4 บริษัท ซึ่งมีข้อมูลการผลิต ดังแสดงในตาราง 7 และภาพ 2

ตาราง 7 ข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

บริษัท	ที่อยู่	วัตถุดิบในการผลิต	กระบวนการผลิต	ปริมาณการผลิตต่อปี
บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด 3-48(13)-1/37ชบ ประเภทโรงงาน 48(13) ISIC 2029 TSIC20299	35/2 ม.3 ต.นาเวก อ.พนัสนิคม จ.ชลบุรี	กะลามะพร้าว	ไอน้ำ	7,500 ตัน
บริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด 3-48(13)-1/35นม ประเภทโรงงาน 48(13),106 ISIC 2029 TSIC 20299	67 ม.2 ต.หนองบัว ศาลา อ.เมือง นครราชสีมา จ.นครราชสีมา	กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ไม้ยูคาลิปตัส	ไอน้ำ	12,000 ตัน
กัณฑ์เอนกนคร จ3-2(7)-2/58ลพ ประเภทโรงงาน 2(7) ISIC 1030 TSIC 10309	ม.12 ต.บ้านธิ อ.บ้านธิ จ.ลำพูน	กะลามะพร้าว	ไอน้ำ	อยู่ระหว่างทดลองผลิต
บริษัท ชิชูกะ จำกัด 3-48(13)-1/54รป ประเภทโรงงาน 48(13) ISIC 2029 TSIC20299	190/1 ม.1 ต.อ่างหิน อ.ปากท่อ จ.ราชบุรี	กะลามะพร้าว	ไอน้ำ	บริษัทในเครือบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2561



ภาพ 2 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย แยกตามวัตถุดิบที่ผลิต

จากข้อมูลพบว่า อุตสาหกรรมผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศไทย มีผู้ผลิตหลัก 2 บริษัท คือ บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด ตั้งอยู่ที่จังหวัดชลบุรี เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวทั้งชนิดเกล็ด (Granular) และชนิดผง (Powder) ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) โดยมีบริษัทในเครือ ได้แก่ บริษัท ชิซูกะ จำกัด ตั้งอยู่ที่จังหวัดราชบุรี ซึ่งใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตเช่นเดียวกับบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด โดยผลิตส่งให้แก่บริษัทบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด เท่านั้น ไม่มีการจัดจำหน่ายเอง รวมทั้งสองบริษัทมีกำลังการผลิต ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวทั้งสิ้น 7,500 ตันต่อปี และ บริษัท ซี.ใจแกนติด คาร์บอน จำกัด ตั้งอยู่ที่จังหวัดนครราชสีมา มีการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดเกล็ด (Granular) และชนิดผง (Powder) จากวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งมีกำลังการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว 10,800 ตันต่อปี จากกะลาปาล์ม 720 ตันต่อปี และจากไม้ยูคาลิปตัส 480 ตันต่อปี โดยราคาขายจะอยู่ที่ 60-200 บาทต่อกิโลกรัมขึ้นอยู่กับเกรดของถ่าน นอกจากนี้ปัจจุบันมีบริษัทที่กำลังจะดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวอีกหนึ่งแห่ง คือ บริษัท กัณฑ์เอนกนคร ซึ่งในขณะนี้อยู่ในระหว่างเตรียมผลิตจำหน่าย

ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย บางชนิด

จากข้อมูล พบว่า ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศไทย เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศ แสดงดังตาราง 8

ตาราง 8 ตารางเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดที่ผลิตภายในประเทศไทยและชนิดที่ผลิตในต่างประเทศ

ลักษณะสมบัติ	บริษัท คาร์โบ กาณูจน์ จำกัด (ประเทศไทย)	บริษัท ซี.ไจแกนติก คาร์บอน จำกัด (ประเทศไทย)	Calgon Carbon Corporation (USA.)
ชนิดของ วัสดุดิบ	กะลามะพร้าว (C-1)	กะลามะพร้าว (C-2)	กะลาปาล์ม (P-1)
			ไม้ยูคา ลิปตัส (U-1)
			FILTRASORB ® 300-M (ปีทูนีนัส)
ขนาด			
- ใหญ่กว่า ตะแกรง#8 (2.36 มม.)	5%	1.3%	1.5%
- ใหญ่กว่า ตะแกรง#30 (0.60 มม.)	5%	4.1%	1.8%
ความชื้น	3%	2%	4.3%
Surface area (ตร.ม./ก.)	1,161	>1,100	>1,100
Iodine Number (มก./ก.)	1,114.0	983.7	987.8
			966.1
			900.0

**ที่มา:** เอกสารประกอบการขายบริษัทคาร์โบกาณูจน์ จำกัด, บริษัท ซี.ไจแกนติก คาร์บอน จำกัด และบริษัท Calgon Carbon Corporation

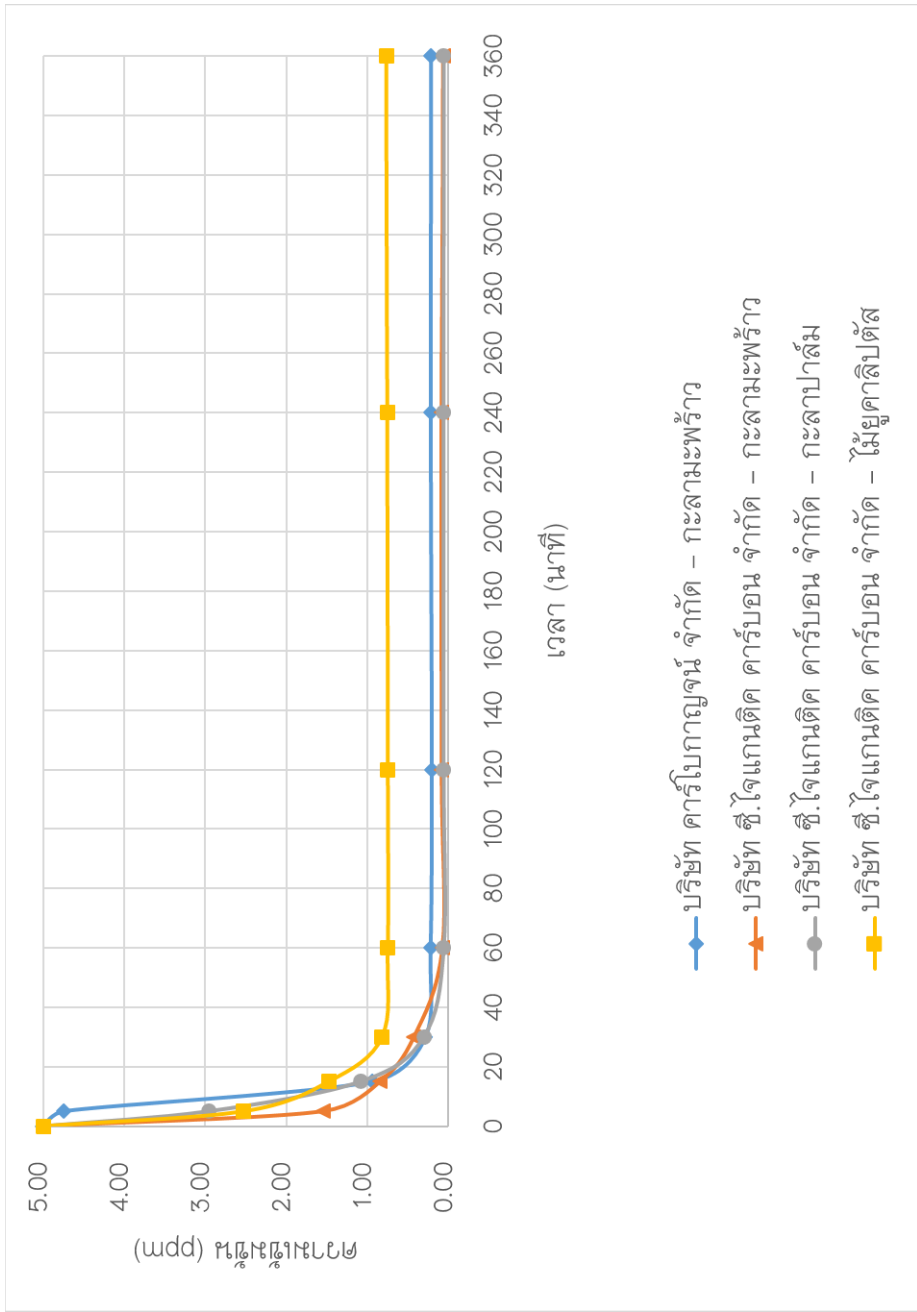
จากตาราง 8 พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ผลิตจากกะลามะพร้าวของ บริษัท คาร์โบกาณูจน์ จำกัด (C-1) มีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.60–2.36 มิลลิเมตร (ตะแกรงขนาด 8–30) ปริมาณ 90% มีความชื้น 3% มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย (Surface area) เท่ากับ 1,161 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับ (Iodine Number) เท่ากับ 1,114 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ผลิตจากกะลามะพร้าวของบริษัท ซี.ไจแกนติก คาร์บอน จำกัด (C-2) มีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.6 – 2.36 มิลลิเมตร (ตะแกรงขนาด 8–30) ปริมาณ 94.6% มีความชื้น 2% มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย

เท่ากับ 1,100 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 983.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ไจแกนต์ิค คาร์บอน จำกัด (P-1) มีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.60–2.36 มิลลิเมตร (ตะแกรงขนาด 8–30) ปริมาณ 96.7% มีความชื้น 4.3% มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย เท่ากับ 1,100 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 987.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ไจแกนต์ิค คาร์บอน จำกัด (U-1) มีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.6–2.36 มิลลิเมตร (ตะแกรงขนาด 8–30) ปริมาณ 93.5% มีความชื้น 4.7% มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย เท่ากับ 1,100 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 966.1 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา ของบริษัท Calgon Carbon Corporation พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.6–2.36 มิลลิเมตร (ตะแกรงขนาด 8–30) ปริมาณ 81% มีความชื้น 2% มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย เท่ากับ 900–1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 900 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับที่ผลิตในต่างประเทศ ซึ่งขายในท้องตลาดทั่วไป

### ผลการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

การหาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนสังกะสี

การทดลองหาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ (Equilibrium time) โลหะหนักที่พบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ได้แก่ ไอออนสังกะสี ด้วยถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด (C-1) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท ซี.ไจแกนต์ิค คาร์บอน จำกัด (C-2) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ไจแกนต์ิค คาร์บอน จำกัด (P-1) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ไจแกนต์ิค คาร์บอน จำกัด (U-1) โดยใช้สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที ผลที่ได้แสดงดังภาพ 3 และตาราง 9



ภาพ 3 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศไทยชนิดต่าง ๆ



ตาราง 9 ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ผู้ผลิต	ระยะเวลา (นาที)	% removal
กะลามะพร้าว	บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด	60	95.55
กะลามะพร้าว	บริษัท ซี.โจแกนติค คาร์บอน จำกัด	60	98.44
กะลาปาล์ม	บริษัท ซี.โจแกนติค คาร์บอน จำกัด	60	98.78
ไม้ยูคาลิปตัส	บริษัท ซี.โจแกนติค คาร์บอน จำกัด	30	84.99
*FILTRASORB-300	Calgon Carbon Corporation	60	84.05

ที่มา: พรุษกร ใจประดับเพชร, 2549

จากการศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ ดังภาพ 3 และตาราง 9 พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดมีการดูดซับไอออนสังกะสีอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสัมผัส 15 นาที หลังจากนั้นอัตราการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ขึ้นเรื่อย ๆ โดยถ่านกัมมันต์ P-1 สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 98.78% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ C-2 สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 98.44% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที ถ่านกัมมันต์ C-1 สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 95.55% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที และถ่านกัมมันต์ U-1 สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 84.99% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที ตามลำดับ เทียบกับถ่านกัมมันต์ FILTRASORB-300 สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 84.99% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที (พรุษกร ใจประดับเพชร, 2549) มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล และปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกัน

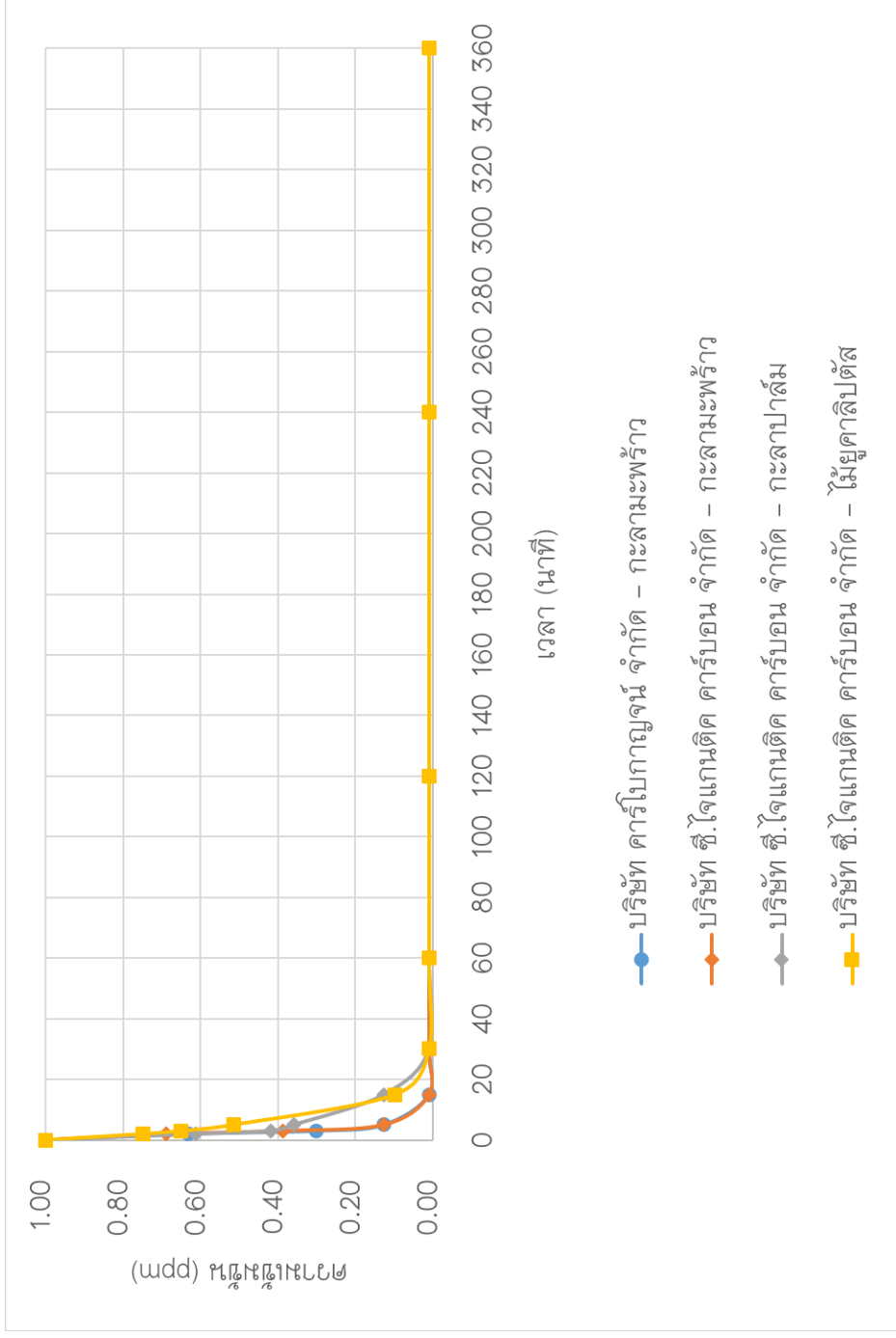
เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time) ของการดูดซับไอออนสังกะสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด โดยพิจารณาจากพื้นที่ผิว ซึ่งสามารถดูได้จากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (พรุษกร ใจประดับเพชร, 2549) และปริมาณไอออนโลหะหนักที่ดูดซับได้ (% removal) พบว่า เมื่อดูจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีน นัมเบอร์สูงสุด คือ ถ่านกัมมันต์ C-1 มีค่าไอโอดีน นัมเบอร์เท่ากับ 1,114 รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ U-1 มีค่าไอโอดีน นัมเบอร์ เท่ากับ 987.8 ถ่านกัมมันต์ C-2 มีค่าไอโอดีน นัมเบอร์ เท่ากับ 983.7 ถ่านกัมมันต์ P-1 มีค่าไอโอดีน นัมเบอร์ เท่ากับ 966.1 และ ถ่านกัมมันต์ FILTRASORB® 300-M มีค่าไอโอดีน นัมเบอร์ เท่ากับ 900.0 ใน

ทำนองเดียวกันถ่านกัมมันต์ P-1 สามารถดูดซับไอออนของสังกะสีได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ C-2 ถ่านกัมมันต์ C-1 ถ่านกัมมันต์ U-1 และ ถ่านกัมมันต์ FILTRASORB® 300-M ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล เนื่องจากเมื่อมีพื้นที่ผิวมาก ย่อมใช้ระยะเวลามากในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ U-1 จึงเข้าสู่สมดุลได้เร็ว และสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักได้น้อยตามไปด้วย ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี เทียบเคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศ

การหาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนตะกั่ว

การทดลองหาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ (Equilibrium time) โลหะหนักที่พบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ได้แก่ ไอออนตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด (C-1) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (C-2) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (P-1) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (U-1) โดยใช้สารละลายตะกั่วความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 เขย่าที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที ผลที่ได้แสดงดังภาพ 4 และตาราง 10





ภาพ 4 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับไออนนตะกัวในน้ำเสี่ยสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศชนิดต่าง ๆ

ตาราง 10 ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ผู้ผลิต	ระยะเวลา (นาที)	% removal
กะลามะพร้าว	บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด	15	100
กะลามะพร้าว	บริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด	15	100
กะลาปาล์ม	บริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด	30	100
ไม้ยูคาลิปตัส	บริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด	30	100
*F-400	Chemviron Carbon (เบลเยียม)	30	67.36

ที่มา: Edidiong Asuquo et al., 2017

จากการศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ ดังภาพ 4 และตาราง 10 พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดมีการดูดซับไอออนตะกั่วอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสัมผัส 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ขึ้นเรื่อย ๆ โดยเมื่อเวลาผ่านไปจนเข้าสู่สมดุลถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ทั้งหมด 100% โดยถ่านกัมมันต์ C-1 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 15 นาที ถ่านกัมมันต์ C-2 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 15 นาที ถ่านกัมมันต์ P-1 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที และถ่านกัมมันต์ U-1 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที ตามลำดับ เทียบกับถ่านกัมมันต์ F-400 (ผลิตในประเทศเบลเยียม) สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงสุดที่ 67.37% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที (Edidiong Asuquo et al., 2017) มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลใกล้เคียงกัน และสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time) ของการดูดซับไอออนตะกั่วของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด โดยพิจารณาจากพื้นที่ผิว ซึ่งสามารถดูได้จากค่าไอโอดีน นัมเบอร์ และปริมาณไอออนโลหะหนักที่ดูดซับได้ พบว่า ไม่สอดคล้องกัน แสดงว่าการดูดซับไอออนตะกั่วเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มี หมู่ฟังก์ชันนัล (Functional) ต่าง ๆ ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ในการดูดซับ และทำปฏิกิริยากับไอออนของตะกั่ว ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 4 ชนิดมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับไอออนตะกั่วได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใน

ต่างประเทศ มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสีย ซึ่งพบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน และมีความเป็นพิษสูงอีกด้วย

### ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic)

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา เพื่อให้ทราบถึงความรวดเร็วในการดูดซับ และปัจจัยของความเข้มข้นที่ส่งผลต่ออัตราการดูดซับ ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ โดยที่

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero-order reactions) เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ไม่มีผลต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



ถ้ากำหนดให้ C แทนความเข้มข้นของสาร A อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ A เมื่อเทียบกับเวลา แสดงได้ดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = k = -r \quad (\dots 11)$$

เมื่อ  $\frac{dC}{dt} = r$  อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น

มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน หรือต่อชั่วโมง

$k$  = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน หรือต่อชั่วโมง

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 11 จะได้ว่า

$$\int_{C_0}^C dC = -k \int_0^t dt \quad (\dots 12)$$

เมื่อ  $C$  = ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$C_0$  = ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาเริ่มต้น มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$t$  = เวลา มีหน่วยเป็น วัน หรือต่อชั่วโมง  
เมื่อแก้สมการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$\ln \frac{C}{C_0} = -kt \quad (\dots 13)$$

หรือ  $C - C_0 = -kt \quad (\dots 14)$

หรือ  $C = C_0 - kt \quad (\dots 15)$

ซึ่งจากสมการ 15 เป็นรูปแบบของสมการเส้นตรง  $y = b + mx$  เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟ ระหว่างความเข้มข้น (C) และเวลา (t) กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง และมีความชัน (Slope) เท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ดังนั้นจากปฏิกิริยาการดูดซับ ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายไอออน ณ เวลาต่าง ๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับช่วงเวลา แล้วกราฟแสดงออกมาเป็นเส้นตรง จะแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบสมการอันดับศูนย์ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นไม่มีผลต่อความเร็วในการดูดซับ

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reactions) เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



ถ้ากำหนดให้ C แทนความเข้มข้นของสาร A อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ A เมื่อเทียบกับเวลา แสดงได้ดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = kC = -r \quad (\dots 17)$$

เมื่อ  $\frac{dC}{dt} = r$  อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น

มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน หรือต่อชั่วโมง

$k$  = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น วัน<sup>-1</sup> หรือชั่วโมง<sup>-1</sup>



$C$  = ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร  
เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 17 จะได้ว่า

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -k \int_0^t dt \quad (\dots 18)$$

เมื่อแก้สมการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$\ln C \Big|_{C_0}^C = -kt \quad (\dots 19)$$

หรือ  $\ln C - \ln C_0 = -kt \quad (\dots 20)$

หรือ  $\ln C = \ln C_0 - kt \quad (\dots 21)$

ซึ่งจากสมการ 21 เป็นรูปแบบของสมการเส้นตรง  $y = b + mx$  เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟ ระหว่างค่าลอการิทึมของความเข้มข้น ( $\ln C$ ) และเวลา ( $t$ ) กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง และมี ความชัน (Slope) เท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) ดังนั้นจากปฏิกิริยาการดูดซับ ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของความเข้มข้นของสารละลายไอออน ณ เวลาต่าง ๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับช่วงเวลา แล้วกราฟแสดงออกมาเป็นเส้นตรง จะแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบสมการอันดับหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อความเร็วในการดูดซับ

ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second-order reactions) เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลเป็นทวีคูณต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



ถ้ากำหนดให้  $C$  แทนความเข้มข้นของสาร A อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ A เมื่อเทียบกับเวลา แสดงได้ดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = kC^2 = -r \quad (\dots 23)$$

เมื่อ  $\frac{dC}{dt} = r$  อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น

มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน หรือต่อชั่วโมง

$k$  = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อวัน หรือต่อชั่วโมง

$C$  = ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 23 จะได้ว่า

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C^2} = -k \int_0^t dt \quad (\dots 24)$$

เมื่อแก้สมการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$-\frac{1}{C} \Big|_{C_0}^C = -kt \quad (\dots 25)$$

หรือ

$$-\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} = -kt \quad (\dots 26)$$

หรือ

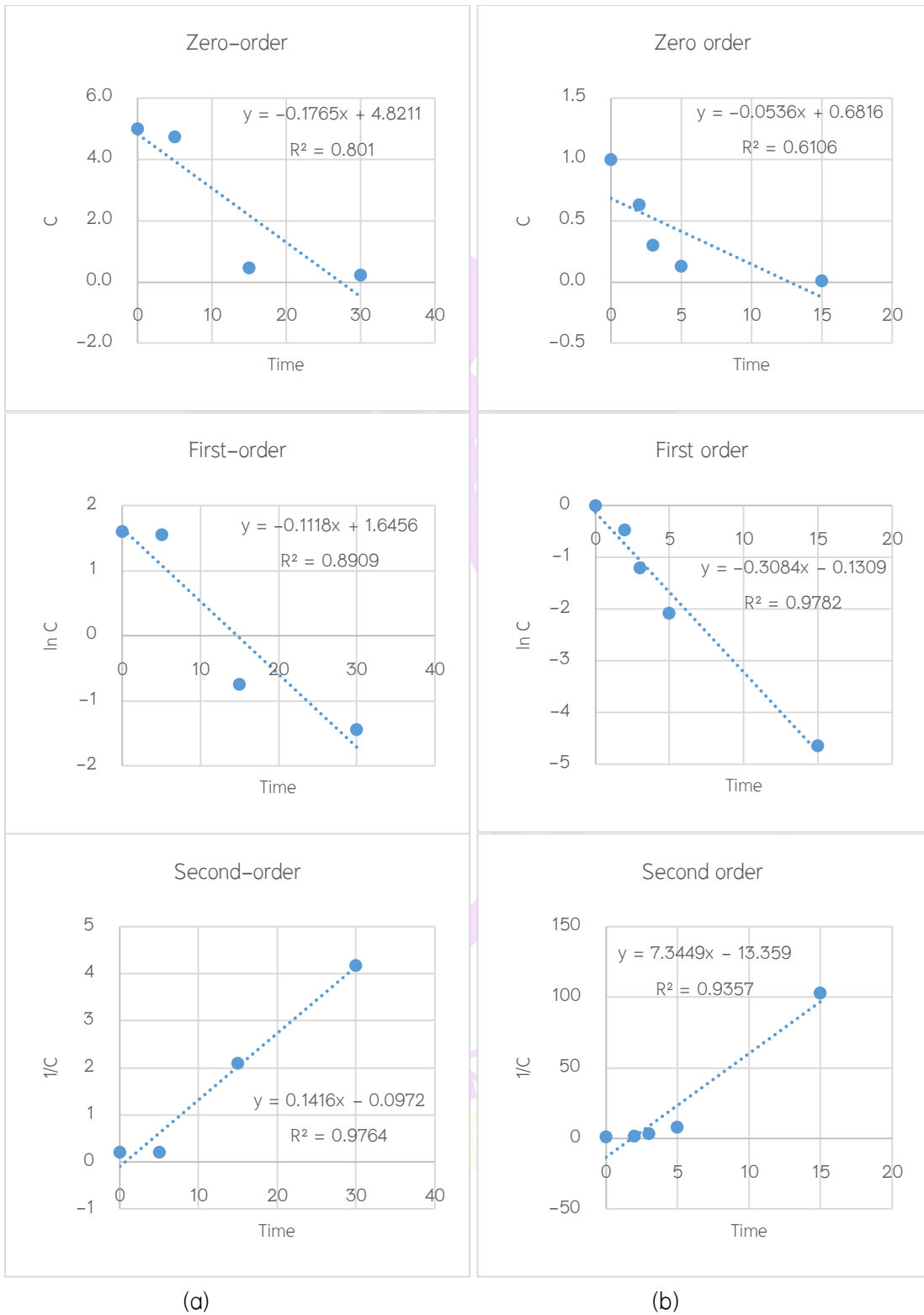
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} - kt \quad (\dots 27)$$

ซึ่งจากสมการ 27 เป็นรูปแบบของสมการเส้นตรง  $y = b + mx$  เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟ ระหว่างค่าเศษส่วนของความเข้มข้น ( $1/C$ ) และเวลา ( $t$ ) กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง และมีความชัน (Slope) เท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) ดังนั้นจากปฏิกิริยาการดูดซับ ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเศษส่วนของความเข้มข้นของสารละลายไอออน ณ เวลาต่าง ๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับช่วงเวลา แล้วกราฟแสดงออกมาเป็นเส้นตรง จะแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบสมการอันดับสอง แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อความ

รวดเร็วในการดูดซับเป็นทวิคูณ ซึ่งเมื่อความเข้มข้นสูงจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว (Tom D. Reynold and Paul A. Richards, 1996)

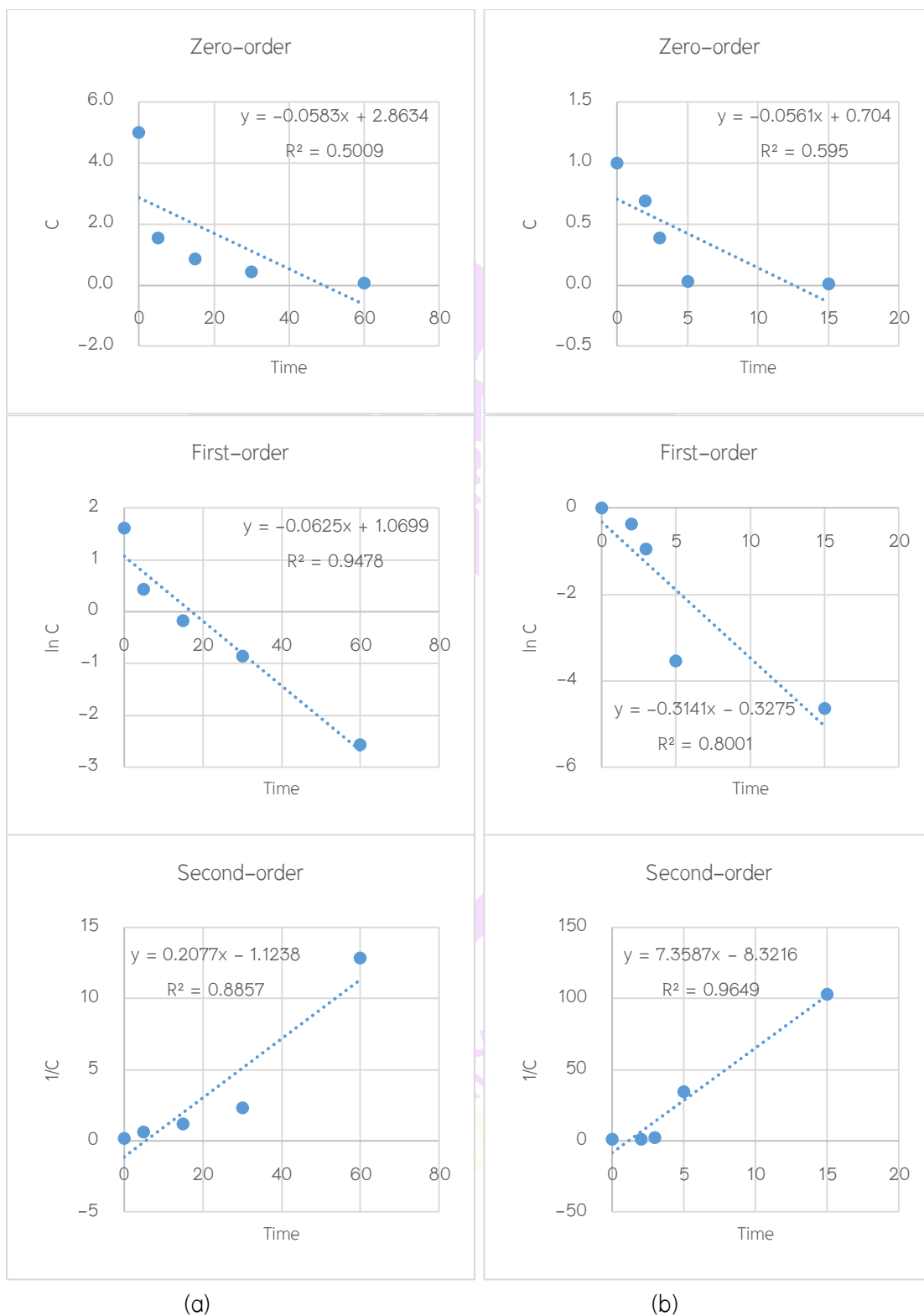
การทดลองหาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic) ไอออนโลหะหนักที่พบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ได้แก่ ไอออนสังกะสี และไอออนตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด (C-1) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (C-2) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (P-1) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ใจแกนติค คาร์บอน จำกัด (U-1) โดยใช้สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ด้วยวิธี Graphical method แบบ Linear equation ผลที่ได้แสดงดังภาพ 5-8





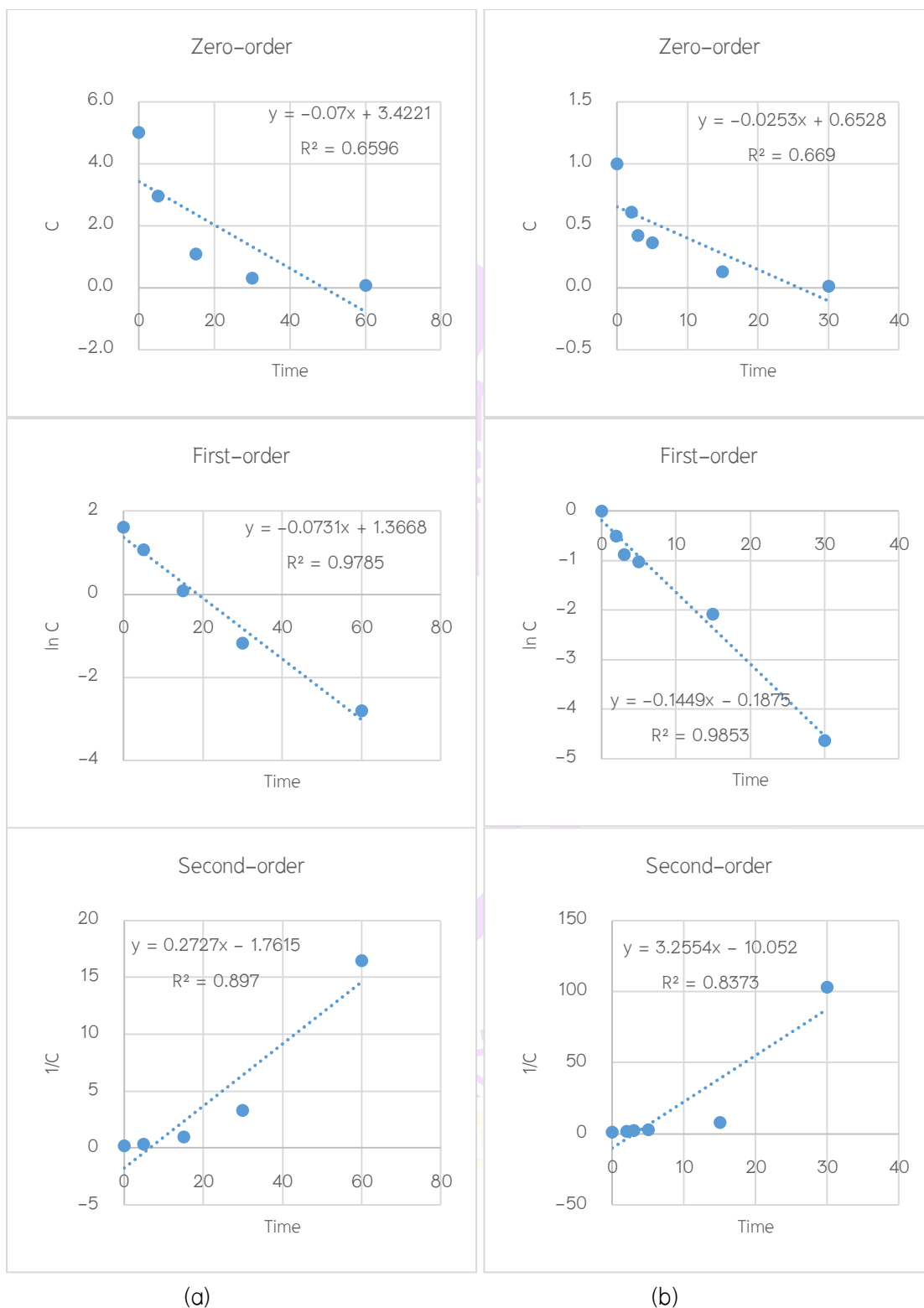
ภาพ 5 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ U-1

(a) ไอออนสังกะสี (b) ไอออนตะกั่ว



ภาพ 6 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ C-2

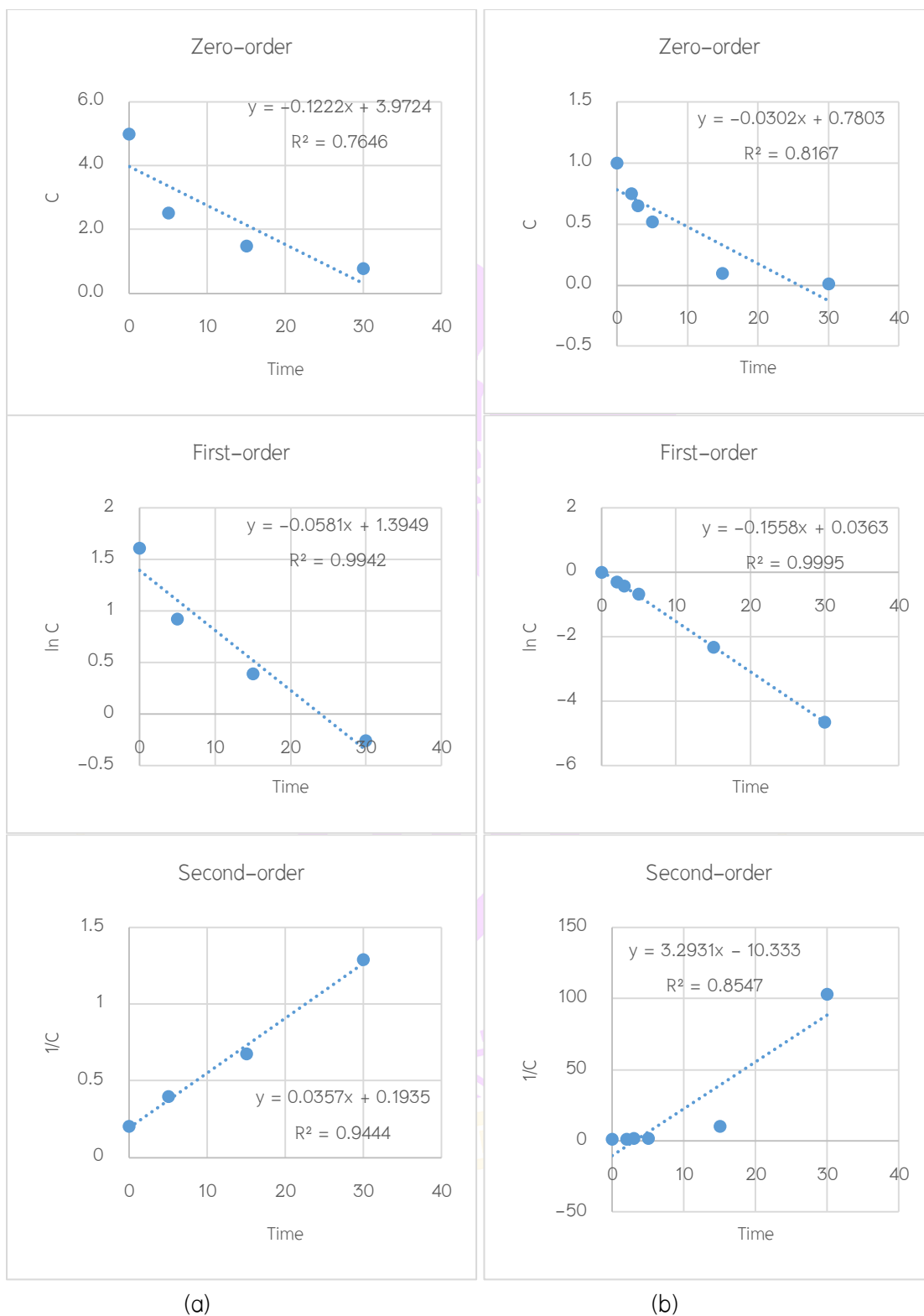
(a) ไอออนสังกะสี (b) ไอออนตะกั่ว



ภาพ 7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ P-1

(a) ไอออนสังกะสี (b) ไอออนตะกั่ว





ภาพ 8 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ U-1

(a) ไอโซนสังกะสี (b) ไอโซนตะกั่ว

จากกราฟสามารถวิเคราะห์และสรุปพฤติกรรมการดูดซับไอออนสังกะสีของ ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดในแง่อัตราการดูดซับ ได้ดังตาราง 11

**ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศไทย ชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method**

ชนิด	ลำดับของปฏิกิริยา					
	Zero-order		First-order		Second-order	
	$K_0$ (mg/l-min)	$R^2$	$K_1$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$K_2$ (l/mg-min)	$R^2$
C-1	0.1765	0.8010	0.1118	0.8909	0.1416	0.9764*
C-2	0.0583	0.5009	0.0625	0.9478*	0.2077	0.8857
P-1	0.0700	0.6596	0.0731	0.9785*	0.2727	0.8970
U-1	0.1222	0.7646	0.0581	0.9942*	0.0357	0.9444

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ C-1 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second-order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_2$ ) เท่ากับ 0.1416 l/mg-min ถ่านกัมมันต์ C-2 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_1$ ) เท่ากับ 0.0625 min<sup>-1</sup> ถ่านกัมมันต์ P-1 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_1$ ) เท่ากับ 0.0731 min<sup>-1</sup> ถ่านกัมมันต์ U-1 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_1$ ) เท่ากับ 0.0581 min<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการดูดซับไอออนสังกะสีซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียมีแนวโน้มเป็นการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First-order) นั่นคือ ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียจะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

และจากกราฟสามารถวิเคราะห์และสรุปพฤติกรรมการดูดซับไอออนตะกั่วของ ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดในแง่อัตราการดูดซับ ได้ดังตาราง 12

ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศไทย ชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method

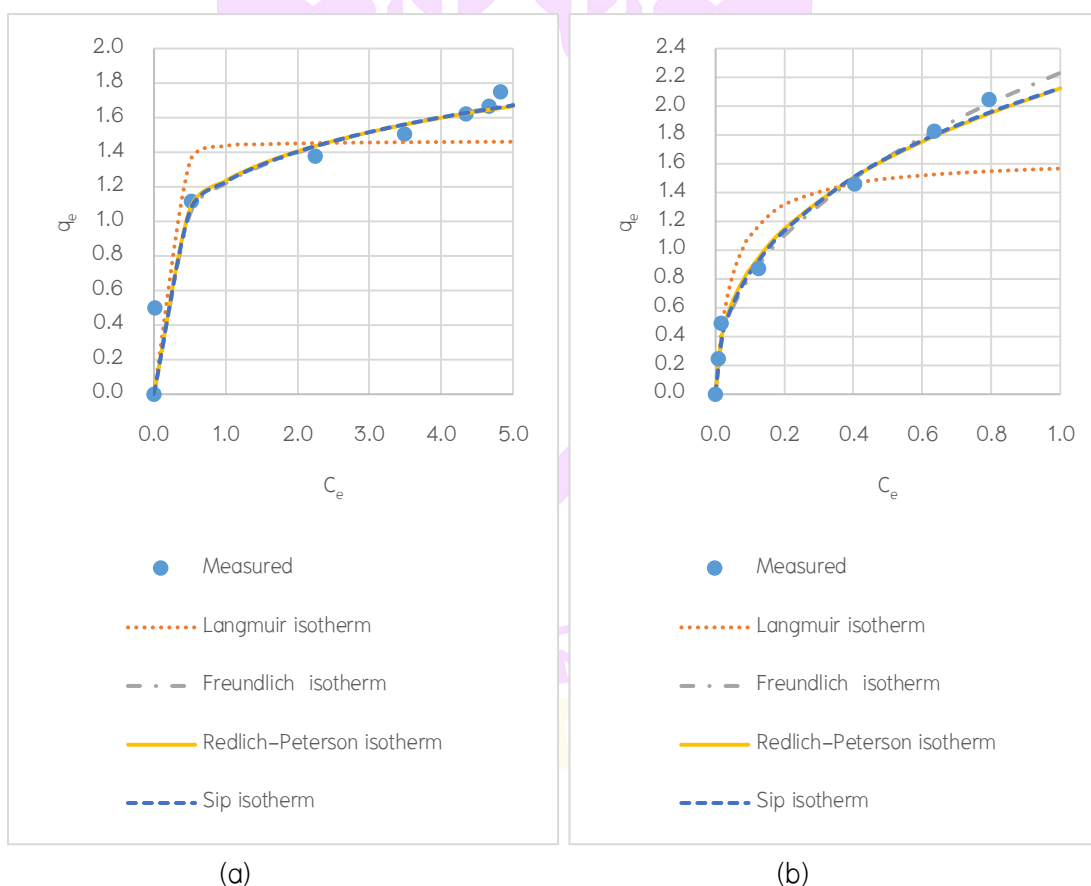
ชนิด	ลำดับของปฏิกิริยา					
	Zero-order		First-order		Second-order	
	$K_1$ (mg/l-min)	$R^2$	$K_1$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$K_2$ (l/mg-min)	$R^2$
C-1	0.0536	0.6106	0.3084	0.9782*	7.3449	0.9357
C-2	0.0561	0.5950	0.3141	0.8001	7.3587	0.9649*
P-1	0.0253	0.6690	0.1449	0.9853*	3.2554	0.8373
U-1	0.0302	0.8167	0.1558	0.9995*	0.32931	0.8547

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ C-1 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_1$ ) เท่ากับ 0.3084 min<sup>-1</sup> ถ่านกัมมันต์ C-2 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_2$ ) เท่ากับ 7.3587 l/mg-min ถ่านกัมมันต์ P-1 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_1$ ) เท่ากับ 0.1449 min<sup>-1</sup> ถ่านกัมมันต์ U-1 มีอัตราเร็วในการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First order) โดยมีค่าคงที่ ( $K_1$ ) เท่ากับ 0.1528 min<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการดูดซับไอออนตะกั่วซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียมีแนวโน้มเป็นการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First-order) นั่นคือความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียจะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

#### ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

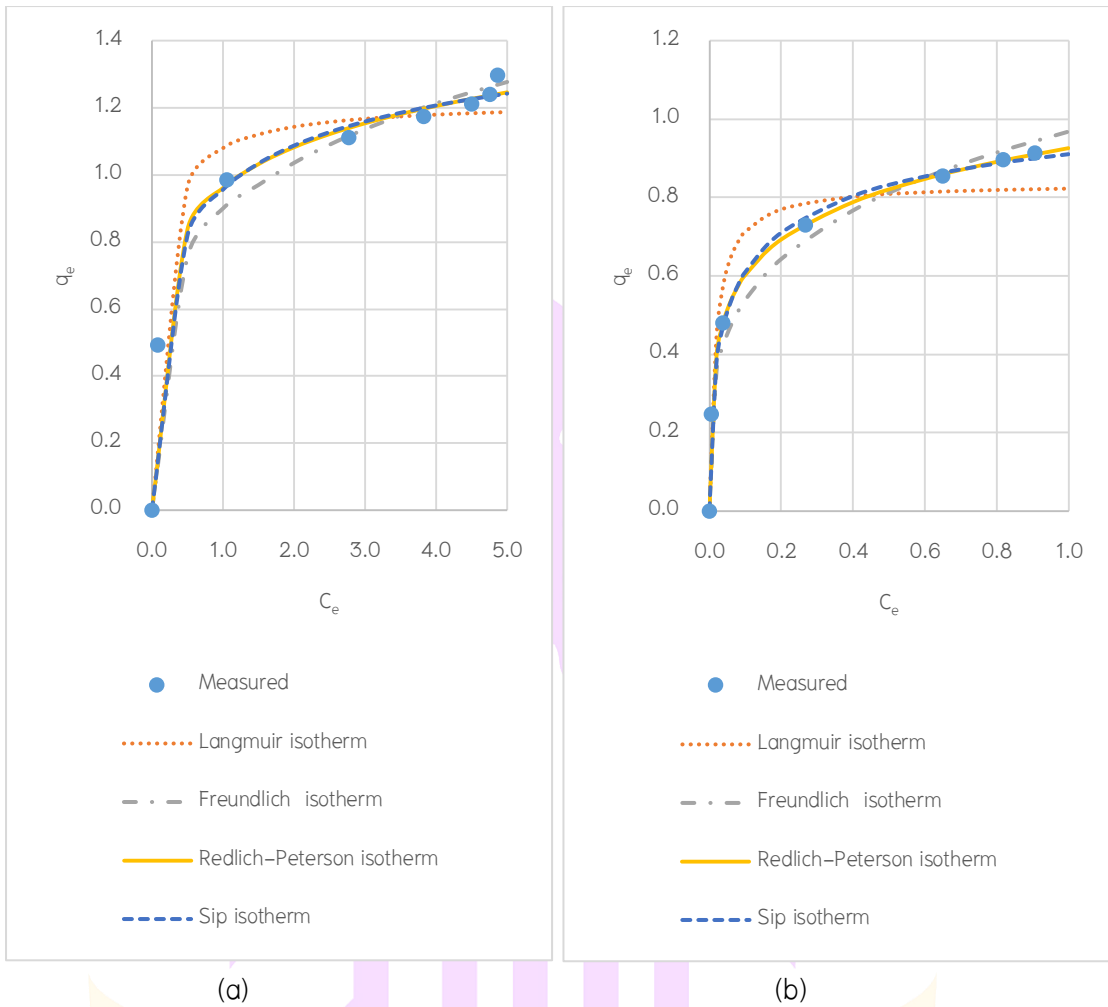
การทดลองเพื่อวิเคราะห์กลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักที่พบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ได้แก่ ไอออนสังกะสี และไอออนตะกั่ว ทำได้โดยการศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ที่เหมาะสมกับพฤติกรรมดูดซับของถ่านกัมมันต์ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด นำมาดูดซับไอออนสังกะสีและตะกั่ว โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารตั้งต้นแทนน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน นำมาทดลองเขาโดยใช้ปริมาณถ่านที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และเวลา 60 นาที จากนั้นนำมาวัดปริมาณไอออนของโลหะหนักที่หลงเหลือ

จากกระบวนการดูดซับ นำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (X) หน่วยเป็น มิลลิกรัม กับปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับ (m) หน่วยเป็นกรัม กับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) นำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมกับสมการไอโซเทอม ซึ่งในการศึกษานี้ใช้สมการสองกลุ่ม คือ สมการสองตัวแปร (Two-parameter isotherm) ได้แก่ ไอโซเทอมแบบแลงคัมเมอร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Frendlich Isotherm) และสมการสามตัวแปร (Two-parameter isotherm) ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบเรดิช-ปีเตอร์สัน (Redlich-Peterson Isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบชิปส์ (Sips Isotherm) หาความเหมาะสมโดยวิธี Non-linear equation และกระบวนการ Sum the square of error (ERRSQ) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ผลที่ได้แสดงดังภาพ 9-12



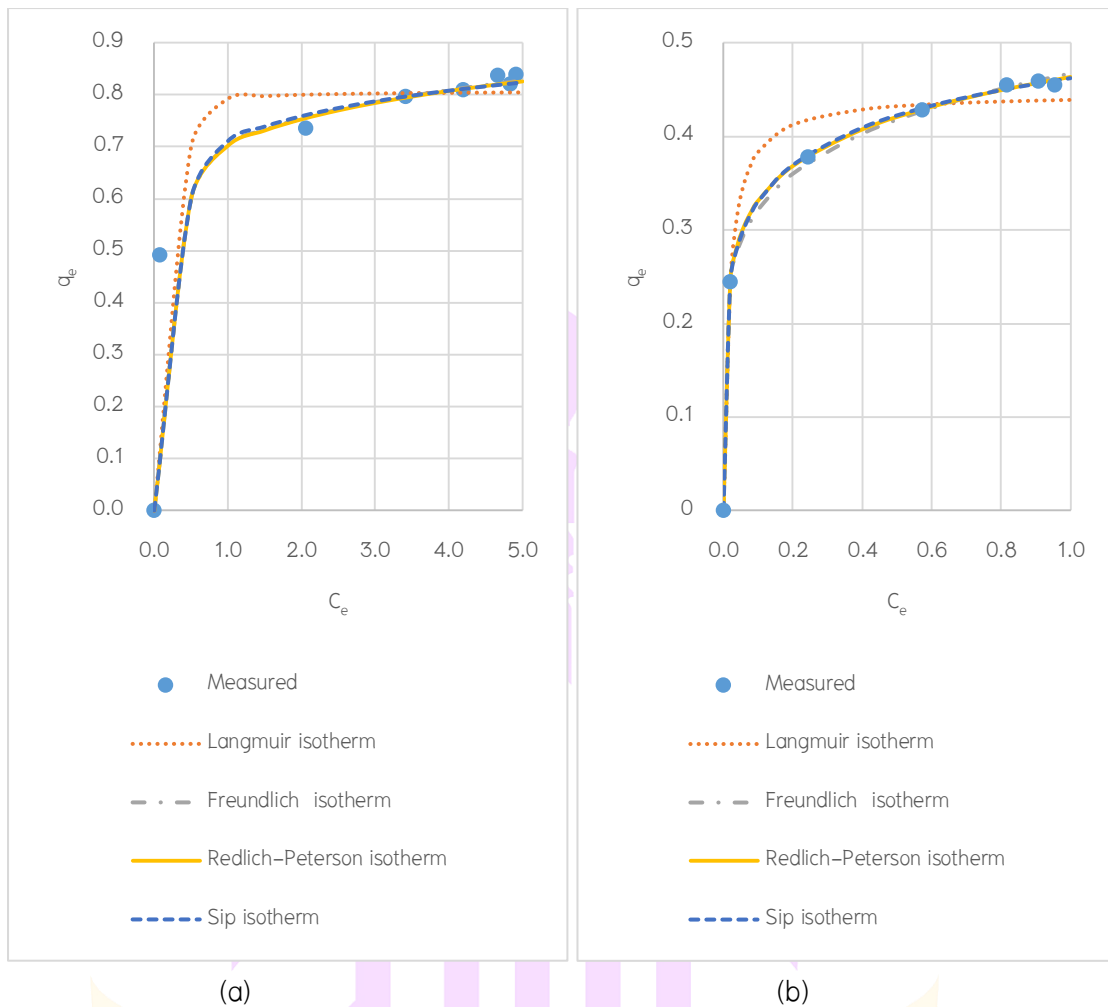
ภาพ 9 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ C-1 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation

(a) ไอออนสังกะสี (b) ไอออนตะกั่ว



ภาพ 10 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของ  
ถ่านกัมมันต์ C-2 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation

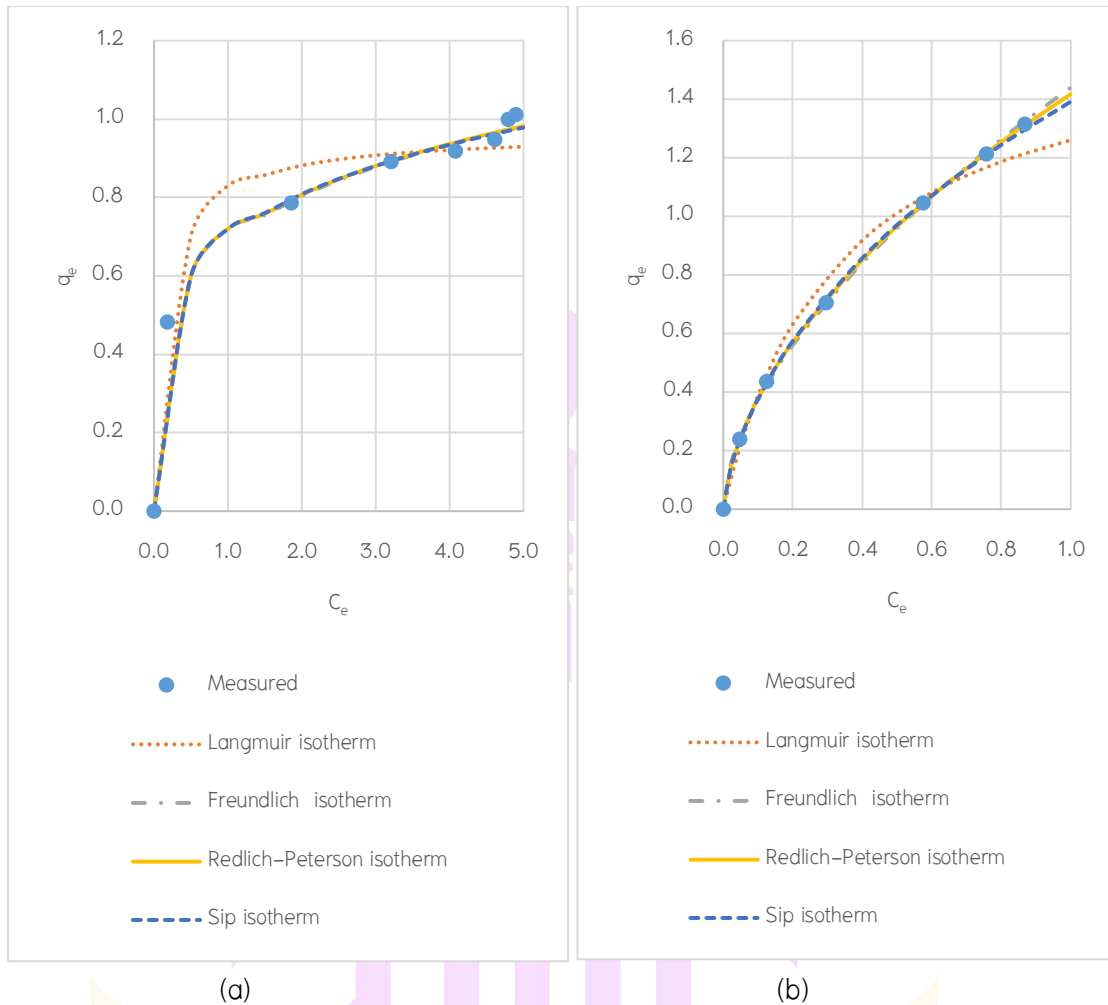
(a) ไอออนสังกะสี (b) ไอออนตะกั่ว



ภาพ 11 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ P-1 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation

(a) ไอโซนสังกะสี (b) ไอโซนตะกั่ว





ภาพ 12 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของ ถ่านกัมมันต์ U-1 โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation

(a) ไอออนสังกะสี (b) ไอออนตะกั่ว

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ และหาความเหมาะสมของสมการไอโซเทอม ชนิดต่าง ๆ กับพฤติกรรมการดูดซับไอออนสังกะสีของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด สามารถสรุปได้ ดังตาราง 13

ตาราง 13 ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการไอโซเทอมและค่า Sum Square of Error ของ การดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation

ชนิด	Langmuir isotherm				Freundlich isotherm			
	$K_L$ (L/mg)	$Q^0$ (mg/g)	$q_{max}$ (mg/g)	SSE	$K_F$ (L/g)	n	$q_{max}$ (mg/g)	SSE
C-1	45.33	1.47	1.46	0.1236	1.22	5.07	1.66	0.0069
C-2	7.59	1.22	1.19	0.0221	0.88	4.38	1.27	0.0115
P-1	51.68	0.81	0.80	0.0938	0.70	9.88	0.83	0.0098
U-1	5.32	0.96	0.93	0.0262	0.69	4.60	0.98	0.0028
ชนิด	Redlich–Peterson isotherm							
	$K_{R1}$ (L/g)	$K_{R2}$ (L/mg)	$\beta$	$q_{max}$ (mg/g)	SSE			
C-1	651.41	526.06	0.81	1.66	0.0065*			
C-2	17.42	17.13	0.86	1.24	0.0034*			
P-1	4018.71	5723.43	0.90	0.82	0.0093*			
U-1	1640.94	2359.45	0.78	0.98	0.0027*			
ชนิด	Sip isotherm							
	$K_{S1}$ (L/g)	$K_{S2}$ (L/mg)	$m_s$	$q_{max}$ (mg/g)	SSE			
C-1	17.54	0.08	0.21	1.66	0.0069			
C-2	1.69	1.31	0.47	1.24	0.0041			
P-1	1.98	0.56	0.15	0.82	0.0121			
U-1	5.33	0.15	0.25	0.98	0.0031			

จากการศึกษากลไกของการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าถ่านกัมมันต์ C-1 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการของ เรดิช-ปีเตอร์สัน (Redlich–Peterson isotherm) มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{R1} = 651.41$  L/g,  $K_{R2} = 526.06$  L/mg และ  $\beta = 0.81$  โดยมีค่า SSE = 0.0065 และมีค่า  $Q_{max} = 1.66$  mg/g ถ่านกัมมันต์ C-2 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการของ เรดิช-ปีเตอร์สัน มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{R1} = 17.42$  L/g,  $K_{R2} = 17.13$  L/mg และ  $\beta = 0.86$  โดยมีค่า SSE = 0.0034 และมีค่า  $Q_{max} = 1.24$  mg/g ถ่านกัมมันต์ P-1 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตาม

สมการของเรดิช-ปีเตอร์สัน มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{R1} = 4018.71$  L/g,  $K_{R2} = 5723.43$  L/mg และ  $\beta = 0.90$  โดยมีค่า  $SSE = 0.0093$  และมีค่า  $Q_{max} = 0.82$  mg/g ถ่านกัมมันต์ U-1 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการของเรดิช-ปีเตอร์สัน มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{R1} = 1640.94$  L/g,  $K_{R2} = 2359.45$  L/mg และ  $\beta = 0.78$  โดยมีค่า  $SSE = 0.0027$  และมีค่า  $Q_{max} = 0.98$  mg/g ซึ่งจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับไอออนสังกะสีที่ละลายอยู่ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 4 ชนิด เป็นไปตามสมการไอโซเทอมแบบเรดิช-ปีเตอร์สัน ซึ่งเป็นสมการไอโซเทอมแบบสามตัวแปร แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นไปตามทั้งสมการของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และสมการของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) กล่าวคือการดูดซับเกี่ยวข้องกับการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพ แต่เมื่อพิจารณาจากตัวแปร  $\beta$  แล้วพบว่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า กลไกการดูดซับจะเป้นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่า นั่นคือ เป็นการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพ โดยมีสมมติฐาน คือ เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน (ตอพงษ์ กริธาชาติ, 2558) ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมในการดูดซับแล้วพบว่า กลไกในการดูดซับนั้นมีความซับซ้อนและมีตัวแปรในการดูดซับมากกว่าสองตัวแปร ทำให้สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 3 ตัวแปร (Three-parameter isotherm) สามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้ดีกว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 2 ตัวแปร (Two-parameter isotherm) และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสูงสุดในการดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ( $Q_{max}$ ) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีสูงที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด C-1 รองลงมาคือ ชนิด C-2, U-1 และ P-1 ตามลำดับ

และจากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ และหาความเหมาะสมของสมการไอโซเทอมชนิดต่าง ๆ กับพฤติกรรมการดูดซับไอออนตะกั่วของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด สามารถสรุปได้ดังตาราง 14

ตาราง 14 ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการไอโซเทอมและค่า Sum Square of Error ของ การดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยชนิดต่าง ๆ โดยวิธี Graphical method แบบ Nonlinear equation

ชนิด	Langmuir isotherm				Freundlich isotherm			
	$K_L$ (L/mg)	$Q^0$ (mg/g)	$q_{max}$ (mg/g)	SSE	$K_F$ (L/g)	n	$q_{max}$ (mg/g)	SSE
C-1	20.05	1.65	1.55	0.2367	2.23	2.28	2.02	0.0801
C-2	57.22	0.84	0.82	0.0765	0.97	3.93	0.95	0.0247
P-1	61.10	0.45	0.44	0.0160	0.47	6.18	0.46	0.0008
U-1	3.01	1.68	1.22	0.0366	1.44	1.71	1.33	0.0013
ชนิด	Redlich–Peterson isotherm							
	$K_{R1}$ (L/g)	$K_{R2}$ (L/mg)	$\beta$	$q_{max}$ (mg/g)	SSE			
C-1	98.36	45.27	0.64	1.95	0.0715*			
C-2	102.87	110.06	0.84	0.91	0.0001*			
P-1	126.62	272.13	0.86	0.46	0.0002*			
U-1	19.10	12.47	0.49	1.31	0.0004*			
ชนิด	Sip isotherm							
	$K_{S1}$ (L/g)	$K_{S2}$ (L/mg)	$m_s$	$q_{max}$ (mg/g)	SSE			
C-1	7.63	0.39	0.49	1.96	0.0800			
C-2	1.18	3.34	0.50	0.90	0.0017			
P-1	0.84	1.23	0.28	0.46	0.0003			
U-1	5.32	0.35	0.67	1.30	0.0009			

จากการศึกษากลไกของการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ C-1 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการของเรดิช-ปีเตอร์สัน (Redlich–Peterson Isotherm) มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{S1} = 98.36$  L/g,  $K_{S2} = 45.27$  L/mg และ  $\beta = 0.64$  โดยมีค่า SSE = 0.0715 และมีค่า  $Q_{max} = 1.95$  mg/g ถ่านกัมมันต์ C-2 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการของเรดิช-ปีเตอร์สัน มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{S1} = 102.87$  L/g,  $K_{S2} = 110.06$  L/mg และ  $\beta = 0.84$  โดยมีค่า SSE = 0.0001 และมีค่า  $Q_{max} = 0.91$  mg/g ถ่านกัมมันต์ U-1 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตาม

สมการของ เรดิช-ปีเตอร์สัน มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{S1} = 126.62$  L/g,  $K_{S2} = 272.13$  L/mg และ  $\beta = 0.86$  โดยมีค่า  $SSE = 0.0002$  และมีค่า  $Q_{max} = 0.46$  mg/g ถ่านกัมมันต์ U-1 มีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการของเรดิช-ปีเตอร์สัน มีค่าคงที่การดูดซับ คือ  $K_{S1} = 19.10$  L/g,  $K_{S2} = 12.47$  L/mg และ  $\beta = 0.49$  โดยมีค่า  $SSE = 0.0004$  และมีค่า  $Q_{max} = 1.31$  mg/g ซึ่งจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับไอออนตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 4 ชนิด เป็นไปตามสมการไอโซเทอมแบบเรดิช-ปีเตอร์สัน ซึ่งเป็นสมการไอโซเทอมแบบสามตัวแปร แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นไปตามทั้งสมการของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และสมการของฟรูนดลิช (Freundlich isotherm) กล่าวคือการดูดซับเกี่ยวข้องกับการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพ แต่เมื่อพิจารณาจากตัวแปร  $\beta$  แล้วพบว่า ส่วนใหญ่เข้าใกล้ 1 แสดงว่า กลไกการดูดซับจะเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่า นั่นคือ เป็นการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพ โดยมีสมมติฐาน คือ เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน (ต่อพงษ์ กริธาชาติ, 2558) ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมในการดูดซับแล้วพบว่า กลไกในการดูดซับนั้นมีความซับซ้อนและมีตัวแปรในการดูดซับมากกว่าสองตัวแปร ทำให้สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 3 ตัวแปร (Three-parameter isotherm) สามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้ดีกว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 2 ตัวแปร (Two-parameter isotherm) และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสูงสุดในการดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ( $Q_{max}$ ) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด C-1 รองลงมาคือ ชนิด U-1, C-2 และ P-1 ตามลำดับ

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

ข้อมูลการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

ปัจจุบันในประเทศไทย มีผู้ผลิตและจำหน่ายถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น 2 บริษัท เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และไม้ยูคาลิปตัส ทั้งชนิดเกล็ด (Granular) และชนิดผง (Powder) ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) มีกำลังการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว 18,300 ตันต่อปี จากกะลาปาล์ม 720 ตันต่อปี และจากไม้ยูคาลิปตัส 480 ตันต่อปี โดยราคาขายจะอยู่ที่ 60–200 บาทต่อกิโลกรัมขึ้นอยู่กับเกรดของถ่านกัมมันต์

จากการรวบรวมข้อมูลพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย ผลิตจากกะลามะพร้าวเป็นหลัก โดยวัตถุดิบมาจากอุตสาหกรรมมะพร้าวทั้งบริเวณภายในประเทศและส่งออก ซึ่งมีผลพลอยได้คือ กะลามะพร้าว เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ โดยกะลามะพร้าวเหล่านี้มักถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอบแห้งเนื้อมะพร้าว และเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนตามบ้านเรือน แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อกำเนิดไอน้ำ เนื่องจากจะทำให้เกิดการกัดกร่อนสูง (พรรษกร ใจประดับเพชร, 2549) องค์ประกอบของกะลามะพร้าวคล้ายกับไม้เนื้อแข็ง ต่างกันตรงที่กะลามะพร้าวมีเซลลูโลส (Cellulose) ต่ำกว่าไม้เนื้อแข็ง แต่มีลิกนิน (Lignin) สูงกว่าเหมาะแก่การนำมาผลิตเป็นถ่านเนื่องจากมีราคาถูกและมีความหนาแน่นสูง แตกหักป่นยาก ซึ่งจากข้อมูลกรมส่งเสริมการเกษตร (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2560) พบว่าปัจจุบันประเทศมีพื้นที่เพาะปลูกมะพร้าวทั้งสิ้น 1,159,408 ไร่ ทั่วประเทศทุกภาคของประเทศไทย โดยมีการเพาะปลูกมากที่สุด ในภาคใต้ โดยมากที่สุด คือ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี และจังหวัดชุมพร ตามลำดับ มีผลผลิตรวม 1,231 ล้านตัน คิดเป็นปริมาณกะลามะพร้าวทั้งสิ้นประมาณ 74 ล้านตัน ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ให้เพียงพอต่อความต้องการในขนาดได้

คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

จากการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ผลิตในประเทศไทยมีลักษณะทางกายภาพ ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาดทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตในต่างประเทศจากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous coal) ในส่วนของประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งดูจากค่าไอโอดีน นัมเบอร์ พบว่ามีประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ใน



ห้องตลาดที่ผลิตในต่างประเทศ ดังนั้น ในอนาคตการใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดมลพิษทั้งในน้ำและอากาศ โดยเฉพาะการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งรองรับการเติบโตของประเทศในอนาคต จะมีต้นทุนถูกลง เนื่องจากสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ไม่ต้องนำเข้า มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศได้เป็นอย่างดี

#### ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7 ของถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท ซี.ใจแกนติคคาร์บอน จำกัด (P-1) สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 98.78% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวของบริษัท ซี.ใจแกนติคคาร์บอน จำกัด (C-2) สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 98.44% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด (C-1) สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 95.55% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท ซี.ใจแกนติคคาร์บอน จำกัด (U-1) สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 84.99% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที ตามลำดับ เทียบกับถ่านกัมมันต์ FILTRASORB-300 สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุดที่ 84.99% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 60 นาที (พรชกร ใจประดับเพชร, 2549) โดยพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี เทียบเคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศ

จากการศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ทั้งหมด 100% โดยถ่านกัมมันต์ C-1 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 15 นาที ถ่านกัมมันต์ C-2 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 15 นาที ถ่านกัมมันต์ P-1 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที และถ่านกัมมันต์ U-1 มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที ตามลำดับ เทียบกับถ่านกัมมันต์ F-400 (ผลิตในประเทศเบลเยียม) สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงสุดที่ 67.37% มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที (Edidiong Asuquo et al., 2017) มีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลใกล้เคียงกัน และสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีกว่า และพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีหมู่

ฟังก์ชันนัล (Functional) ต่าง ๆ ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ในการดูดซับ และทำปฏิกิริยากับไอออนของตะกั่ว ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 4 ชนิดมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับไอออนตะกั่วได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศ มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสีย ซึ่งพบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน และมีความเป็นพิษสูงอีกด้วย

#### ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic)

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนสังกะสี และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า อัตราเร็วในการดูดซับไอออนสังกะสี และตะกั่วซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียมีแนวโน้มเป็นการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First-order) นั่นคือ ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียจะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

#### ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

จากการศึกษากลไกของการดูดซับไอออนสังกะสีและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 4 ชนิด เป็นไปตามสมการไอโซเทอมแบบเรดิช-ปีเตอร์สัน ซึ่งเป็นสมการไอโซเทอมแบบสามตัวแปร แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นไปตามทั้งสมการของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และสมการของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) กล่าวคือการดูดซับเกี่ยวข้องกับการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพ แต่เมื่อพิจารณาจากตัวแปรภายในแล้วพบว่า กลไกการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่า นั่นคือ เป็นการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพ โดยมีสมมติฐาน คือ เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน (ต่อพงษ์ กริธาชาติ, 2558) ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการ ไอโซเทอมในการดูดซับแล้วพบว่า กลไกในการดูดซับนั้นมีความซับซ้อน และมีตัวแปรในการดูดซับมากกว่าสองตัวแปรทำให้สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 3 ตัวแปร (Three-parameter isotherm) สามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้ดีกว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ 2 ตัวแปร (Two-parameter isotherm) และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสูงสุดในการดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ( $Q_{max}$ ) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีสูงที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด C-1 รองลงมาคือ ชนิด C-2, U-1 และ P-1 ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด C-1 รองลงมาคือ ชนิด U-1, C-2 และ P-1 ตามลำดับ

### ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ในน้ำเสียเพื่อให้ใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินมากขึ้น เช่น ค่า BOD, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ เป็นต้น เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อกลไกและประสิทธิภาพในการดูดซับ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ
2. ศึกษากลไกในการดูดซับโลหะหนักตัวอื่น ๆ ที่พบในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน เพื่อให้สามารถดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ทั้งหมด
3. ทดลองกับระบบบำบัดจริง เช่น หอดูดซับ (Adsorption column) เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับแบบสภาวะจริงและสามารถหาต้นทุนในการบำบัดได้



## บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2561). **ข้อมูลโรงงาน**. สืบค้นเมื่อ 5 มิถุนายน 2560, จาก <http://www.diw.go.th/hawk/default.php>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). **กฎหมายและมาตรฐานด้านคุณภาพน้ำ**. สืบค้นเมื่อ 10 มิถุนายน 2560, จาก [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/test\\_regulation5.cfm?task=s4](http://www.pcd.go.th/info_serv/test_regulation5.cfm?task=s4)
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2560). **ข้อมูลสถิติด้านการเกษตร**. สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2560, จาก <https://www.doae.go.th/doae>.
- กระทรวงพลังงาน. (2559). **แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558–2579 (PDP2015)**. สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2560, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/pdp>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. (2559). **กราฟและสถิติ**, สืบค้นเมื่อ 3 มิถุนายน 2560, จาก [www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=76&Itemid=116](http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=76&Itemid=116).
- ฐปณี อุ๋นอารีย์กุล. (2543). **การศึกษาปริมาณธาตุไนโตรเจนในถ่านหิน แหล่งแม่ทะ แหล่งแม่ละเมา และแหล่งกันตัง**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี.
- ณัฐฎาภรณ์ ศรีบุญปวน. (2558). **การใช้พืชฟื้นฟู โลหะหนักในถ่านหินทิ้งกอง**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ต่อพงศ์ กริธาชาติ. (2558). **วิศวกรรมและการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา: พะเยา.
- ธีระ วงศเนตร. (2559). **การปรับปรุงพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเหง้ามันสำปะหลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อน**. การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วท.ม., มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, กำแพงเพชร.
- พรชกร ใจประดับเพชร. (2549). **การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- มานัด แก้วถาวร. (2537). **ผลของไซเตียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ลลิตา นิต์ศนจาร์กุล. (2544). **การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิว**

- โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ วท.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.** (พิมพ์ครั้งที่ 3). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- สุโรชนี สกุลดวงดี. (2545). **การเตรียมถ่านกัมมันต์และการทดสอบความชอบในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้น.** วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- สุจริย์ คู่ยเสงี่ยม. (2544). **การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว.** วิทยานิพนธ์ วท.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- อติชัย นพแก้ว. (2539). **การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก.** วิทยานิพนธ์ วศ.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- อรรณู ขวัญปาน. (2550). **ประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ไม้โกงกาง และเปลือกทุเรียน.** การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วท.ม., มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ.
- Antonio Nieto-Márquez, Angela Pinedo-Flores, Gino Picasso, Evangelina Atanes and Rosario Sun Kou. (2017). Selective adsorption of Pb<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup> and Cd<sup>2+</sup> mixtures on activated carbons prepared from waste tires. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 5(1), 1060–1067.
- Edidiong Asuquo, Alastair Martin, Petrus Nzerem, Flor Siperstein and Xiaolei Fan. (2017). Adsorption of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions using mesoporous activated carbon adsorbent: Equilibrium, kinetics and characterisation studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 5(1), 679–698.
- Frederick W. Pontius. (1990). **Water Quality and treatment.** (1st ed.). New York: McGraw Hill.
- I.A. Aguayo-Villarreal, A. Bonilla-Petriciolet and R. Muñiz-Valencia. (2017). Preparation of activated carbons from pecan nutshell and their application in the antagonistic adsorption of heavy metal ions. **Journal of Molecular Liquids**, 230(1), 686–695.
- J. W. Hassler. (1967). **Activated carbon.** (1st ed.) London: Leonard Hill.
- M. Flues, I.M. Sato, M.A. Scapin, M.E.B. Cotrim and I.M.C. Camargo. (October 4, 2012).

Toxic elements mobility in coal and ashes of Figueira coal power plant, Brazil.

**Sciencedirect**, Retrieved June 3, 2017, from <https://www.sciencedirect.com/journal/fuel>

M. M. Dubinin. (1966). **Chemistry and Physics of Carbon**. (2nd ed.). New York: Marcel Dekker.

Mirjana Brdar, Marina Šćiban, Aleksandar Takačič and Tatjana Došenović. (2012).

Comparison of two and three parameters adsorption isotherm for Cr(VI) onto Kraft lignin. **Chemical Engineering Journal**, 183(1), 108–111.

Morton Corn. (1993). **Handbook of Hazardous Materials**. (1st ed.). San Diego: Academic Press.

Samuel Denton Faust and Osman M. Aly. (November 17, 2013). Adsorption Process for

Water Treatment. **Sciencedirect**, Retrieved June 3, 2017, from

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780409900002500017?via%3Dihub>

Tom D. Reynold and Paul A. Richards. (1996). **Unit operations and processes in environmental engineering**. (2nd ed.). USA: Cengage Learning.

Zümriye Aksu. (January 1, 2001). Equilibrium and Kinetic modeling of Cadmium(II) biosorption by *C.*

*vulgaris* in a batch system: effect of temperature. **Sciencedirect**, Retrieved June 3, 2017,

from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586600002124>







## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ฉัตรชัย จินตกุล
วัน เดือน ปี เกิด	2 กุมภาพันธ์ 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
วุฒิการศึกษา	วศ.บ. เคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร 2553
ที่อยู่ปัจจุบัน	209/4 หมู่ 12 ตำบลอ่าวน้อย อำเภอเมืองประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
ผลงานตีพิมพ์	ฉัตรชัย จินตกุล และต่อพงศ์ กรีธาชาติ (ผู้บรรยาย). (21-22 พฤศจิกายน 2561). กลไกการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงไฟฟ้า ถ่านหินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศไทย. ในการประชุมวิชาการระดับชาติ ปอมท. ประจำปี พ.ศ. 2561 (หน้า 158-166). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

