

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ดินเหนียว (Clay)

ดินเหนียวเป็นดินที่อยู่ลึกลงไปจากผิวหน้าดินที่ใช้ทำเกษตรกรรม เป็นดินที่มีเนื้อเม็ดดินละเอียดมากมีขนาดตั้งแต่  $10^{-6}$  ถึง 0.002 มิลลิเมตร จากเหตุผลนี้ทำให้เม็ดดินอยู่ชิดกันมาก ดินชนิดนี้จึงมีแรงยึดเกาะสูงหรือมีความเหนียว ทำให้น้ำซึมผ่านได้น้อย เนื่องจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินนั้นมีขนาดเล็กมาก โดยปกติจะพบได้บริเวณที่ราบลุ่มซึ่งมีการสะสมของ ปริมาณสารอินทรีย์เป็นจำนวนมาก และมักจะพบในลักษณะที่เป็นสีเทาหรือสีดำ ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา มักนำมาผสมกับดินเชื้อ (Grog) และผ่านกระบวนการเผา ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เอิเทนแวร์ (Earthen Ware) ซึ่งมีลักษณะพรุนตัว (Porous) ในส่วนของสีผลิตภัณฑ์นั้น ขึ้นอยู่กับแร่ธาตุที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน กล่าวคือ

Limonite ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )	ทำให้ดินมีสีครีมเหลืองและน้ำตาล
Pyrite ( $\text{FeS}_2$ )	ทำให้ดินมีสีทองในบางส่วนของดิน
Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	ทำให้ดินมีสีแดง
Iron Silicate	ทำให้ดินมีสีเขียวหรือค่อนข้างเขียว
Manganese (Mn) and Titanium (Ti)	ทำให้ดินมีสีน้ำตาล
สารอินทรีย์	ทำให้ดินมีสีเทา ดำ น้ำตาล น้ำเงิน

(ชฎิล ฉายรัศมี, เมธี ชลไมตรี, สุนทรี เฟื่องฟู, 2541)

ส่วนประกอบของดินเหนียวแตกต่างกันไปตามแหล่งต่างๆ ส่วนประกอบโดยประมาณ อาจจำแนกได้ดังนี้คือ  $\text{SiO}_2$  อยู่ระหว่าง 40 – 60 เปอร์เซ็นต์  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ น้ำในผลึก และอินทรีย์สาร 10 เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{NaO}$  มีเล็กน้อย แร่ดินต่างๆ ที่พบในดินเหนียวพอสรุปได้คือ kaolinite ซึ่งมีทั้งหยาบและละเอียดเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มี montmorillonite และ illite เล็กน้อย แร่อื่นๆที่เป็นส่วนประกอบอยู่ก็มี quartz, mica เป็นต้น ส่วนอินทรีย์สารที่พบได้แก่ lignite, waxes, resin, lignin และ humus นอกจากนี้ก็มีเกลือที่ละลายน้ำได้ เกลือส่วนใหญ่เป็นเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ของ Al, Fe, Ca, Mg, K และ Na (ปรีดา พิมพ์ขาว จำ, 2527)

### 2.1.1 ประเภทดินเหนียว

ดินเหนียวที่พบมากตามพื้นผิวโลกเรียกว่า “ดินเหนียวซิลิเกต” กล่าวคือเป็นดิน ที่มีอะลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ โดยมีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นซ้อนกัน ซึ่งความแตกต่างกันระหว่างดินเหนียวซิลิเกตนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของการเรียงซ้อนกันของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา ซึ่งแบ่งตามลักษณะที่พบได้ง่าย 2 ลักษณะ คือ

1) Kaolinite ในที่นี้หมายถึง Ball Clay ซึ่งเป็นเม็ดดินที่มีความละเอียดสูงมีสูตรโครงสร้าง  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ประกอบด้วย แผ่น ซิลิกา 1 แผ่น ประกบกับแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น โดยซิลิกาและอะลูมินาจะรวมเกาะกับ  $\text{O}_2$  ตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้ง 2 ประสานกันแน่น กลายเป็นผลึกของแร่ดิน Kaolinite คือจะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ เหมือนแผ่นของแร่ไมกา โดยช่องว่าง (Interlayer) ระหว่างแผ่นผลึกที่เรียงซ้อนที่เรียงซ้อนทับกัน มีระยะกว้าง 7 อังสตรอม เป็นระยะที่คงที่ไม่สามารถทำให้กว้างขึ้นหรือแคบลงเข้าหากันได้อีก เนื่องจากถูกยึดไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนอะตอมของซิลิกาและไฮโดรเจนอะตอมของ

อะลูมินา โดยอะตอมไฮโดรเจนในที่นี้คือ กลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ที่เข้ามาแทนที่ออกซิเจนที่อยู่ด้านนอกของแผ่นอะลูมินา

ตามธรรมชาติไฮโดรเจนและออกซิเจนจะมีความสัมพันธ์กัน (Affinity) ที่เกาะยึดกันเป็นอย่างมาก ก็คือพันธะไฮโดรเจน เมื่อแผ่นผลึกของ kaolinite ที่เรียงซ้อนกันอยู่นั้นมีพันธะไฮโดรเจนช่วยเป็นตัวยึดเกาะ ทำให้ช่องว่างระหว่างแผ่นผลึกนั้นแคบและขยายออกไม่ได้ โมเลกุลของน้ำและไอออนลบต่างๆ จึงเข้าแทรกซึมอยู่ในช่องว่างนั้นไม่ได้ จึงเป็นเหตุให้ดินชนิดนี้เกิดพวกนี้ไม่ขยายตัวและไม่หดตัวเมื่อเปียกน้ำ พื้นที่ภายในช่องว่างจึงไม่มีประโยชน์ เพราะน้ำและไอออนต่างๆ เข้าไปไม่ได้ ดังนั้นจึงถือว่าพื้นที่ผิวด้านในของดินเหนียวชนิดนี้ไม่มี โดยจะมีเฉพาะพื้นที่ผิวด้านนอกเท่านั้น โดยทั่วไปดินชนิดนี้มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1 – 5 ไมครอน โดยส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2 – 2 ไมครอน

2) Montmorillonite มีสูตรโครงสร้างคือ  $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$  ผลึกของดินชนิดนี้จะเชื่อมกันไปตามแนวระดับและซ้อนเป็นชั้นๆ เช่นเดียวกับ Kaolinite โดยช่องว่างระหว่างผลึกที่ซ้อนทับกับมีขนาด 9 – 21 อังสตรอม ช่องว่างนี้อาจขยายให้กว้างหรือแคบได้เพราะไม่มีพันธะไฮโดรเจนยึดระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกัน เนื่องจากด้านล่างและด้านบนต่างมี  $O_2$  ซึ่งเป็นของซิลิกา ดังนั้นจึงไม่เกิด พันธะไฮโดรเจน แต่เกิดพันธะออกซิเจนแทน ซึ่งมีแรงเกาะกันอย่างเบาบางมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำและไอออนลบต่างๆ สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ จึงทำให้ระยะระหว่างช่องว่างไม่คงที่ ดังนั้นดินชนิดนี้จึงเกิดการพองตัวและหดได้ง่าย ไม่ว่าดินจะเปียกหรือแห้งเมื่อดินเปียกจะเหนียวไม่ร่วนเหมือน Kaolinite เนื่องจากดินเหนียวพวกนี้ยึดและหดได้ง่ายและมีไอออนสำรองไว้มาก การแตกสลายของผลึกและอนุภาคของดินเหนียวพวกนี้จึงเกิดขึ้นได้ง่ายมาก

ดินเหนียว Montmorillonite มีขนาดอนุภาคเล็กมากเมื่อเทียบกับดินเหนียว Kaolinite คือมีขนาด 0.1 – 1 ไมครอน ทำให้ดินเหนียวชนิดนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า Kaolinite (ชฎิล ฉายรัศมี และคณะ, 2541)



### 2.1.2 ดินเหนียวกับการดูดซับโลหะหนัก

ดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ เพราะในดินเหนียวจะประกอบไปด้วยแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ซึ่งมีสมบัติในการเป็นคอลลอยด์ (Colloids) มีประจุในตัวเอง (Charge) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) รวมทั้งมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก เพราะมีทั้งพื้นที่ผิวชั้นนอก (External Surface) และพื้นที่ผิวชั้นใน (Internal Surface) อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแร่ดินเหนียวจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแร่ดินเหนียวและองค์ประกอบที่มีอยู่ในแร่ดินเหนียว เช่น อินทรียสารและเหล็กออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการดูดซับโลหะหนัก

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนดินเหนียวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบ 2 อย่าง คือ พื้นที่ผิวและประจุที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว โดยพื้นที่ผิวของอนุภาคที่แตกต่างกันเป็นผลเนื่องมาจากขนาดและรูปร่างของอนุภาคโดยตรง ในขณะที่ประจุลบบนอนุภาคดินเหนียวเป็นผลเนื่องมาจาก Isomorphous Substitution และ Ionization ของหมู่ฟังก์ชันบนผิวของดินเหนียว ซึ่งกลไกทั้ง 2 อย่างนี้ทำให้เกิดประจุถาวร (Permanent Charge) นอกจากนี้ประจุที่มีอยู่บนแร่ดินเหนียวยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าพีเอชของดินที่เปลี่ยนไปอีกด้วย (ศิริโรรัตน์ ศรีเกษเพชร, 2543)

### 2.1.3 การเผาดินเหนียว

ระหว่างการเผาจะทำให้โครงสร้างของวัสดุดิบมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เกิดสภาพการหลอมละลาย รวมตัวเข้าด้วยกัน อนุภาคของดินเดิมที่เป็นเม็ดๆเกิดการหดตัวลดพื้นที่ผิวและลดความพรุน ทำให้เนื้อดินที่ได้มีความแกร่ง ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและ ก๊าซได้ดียิ่งขึ้น (ไพฑูรย์ ประสมศรี, 2544) ดินเหนียวเมื่อผ่านกระบวนการเผา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถแบ่ง



ออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

### 1) Dehydration Period แบ่งได้เป็น 2 ระยะ

1.1) Mechanical Dehydration หรือ Water Smoking เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 20 – 150 องศาเซลเซียส โดยน้ำที่ผสมในดินจะเริ่มระเหยออกมาเป็นควันจนกระทั่งดินแห้งสนิทและไม่มีน้ำในดินเหลืออยู่ ดินที่ได้จะมีลักษณะแข็งกว่าเดิม ถ้าหยุดให้ความร้อนและนำดินนั้นมาผสมน้ำ ดินจะอ่อนและมีความเหนียวเหมือนเดิม

1.2) Chemical Dehydration หรือ Chemical Water Smoking เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 150 – 600 องศาเซลเซียส ถ้าให้ความร้อนแก่ดินต่อจากระยะแรก โมเลกุลของดินจะแตก และส่วนที่เป็นน้ำของดินจะระเหยออกไป เหลือดินในรูปของ Meta Kaolinite ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) ถ้าหยุดเผาแล้วนำดินไปผสมน้ำอีก ดินจะแข็งแรงและไม่มี ความเหนียวอีกต่อไป

### 2) Oxidation Period

เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 350 – 950 องศาเซลเซียส สิ่งต่างๆที่ปะปนมากับดิน เช่น เศษไม้ ใบหญ้า จะถูกเผาไหม้ไป นอกจากนี้ เศษแร่ธาตุต่างๆ เช่น พวกลำบองเนต ซัลไฟด์และซัลเฟต จะแตกตัวในช่วงนี้ สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน เช่น น้ำหนัก ขนาด สี และความพรุน จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

### 3) Vitrification Period

เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ส่วนผสมในเนื้อดินบางชนิดเริ่มหลอมละลาย ส่วนที่หลอมจะพยายามละลายส่วนที่ไม่หลอมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนที่ละลายจะไหลไปตามช่องว่าง ทำให้เนื้อดินแน่นทึบ ถ้าหากมีส่วนผสมและอุณหภูมิที่เหมาะสมอาจเกิดการตกผลึกใหม่ในเนื้อดินได้ เพราะอะลูมินาและซิลิกาในเนื้อดินจะรวมตัวกันเป็น  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม ทำให้ดินมีความแกร่งขึ้น (ชฎิล ฉายรัศมี และ

คณะ, 2541)

### สมบัติที่เปลี่ยนไปของดินตามอุณหภูมิการเผาแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่เปลี่ยนไปของดินตามอุณหภูมิการเผา

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
100 - 200	น้ำและความชื้นในดินระเหยกลายเป็นไอ
230 - 573	ผลึกของซิลิกาหรือควอตซ์เปลี่ยนรูปใหม่ ทำให้ดินเกิดการขยายตัวอย่างรุนแรง
450	น้ำในสารประกอบดิน ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) เริ่มระเหย
900 - 950	น้ำระเหยออกจากเนื้อดินหมด อินทรีย์สารในดินถูกเผาไหม้ ดินเปลี่ยนโครงสร้างเกิดการหดตัวจากการหลอมละลายของวัสดุดิบ
1,050 – 1,100	เฟลสปาร์ในเนื้อดินเริ่มหลอมละลาย เกิดเป็น โครงสร้างรูปเข็มประสานกัน เกิดเป็นผลึกมัลไลต์ในเนื้อดินที่มีความแกร่ง การหดตัวอย่างต่อเนื่อง
1200	ดินหลอมละลายปึกูพรุนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โครงสร้างของผลึกดินเปลี่ยนเป็นแก้ว 60 เปอร์เซ็นต์ มัลไลต์ 21 เปอร์เซ็นต์ และควอตซ์ 19 เปอร์เซ็นต์

ที่มา : ไพฑูรย์ ประสมศรี, 2544

### 2.2 กากชีแป้ง (Lutoid)

น้ำยางสดที่ได้มาจากการกรีดต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนมมีสภาพเป็นคอลลอยด์หรือเป็นสารแขวนลอย มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 ถึง 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร

มีค่าพีเอชประมาณ 6.5 ถึง 7.0 ความหนืดของน้ำยางมีค่าประมาณ 12 ถึง 15 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีค่าความหนืดเท่ากับ 1 centipoise) และอาจมีค่าแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง เป็นต้น

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารโม่บริสุทธิ์ เมื่อกรีดมาจากต้นยาง มีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งและสารที่เป็นเนื้อยางแห้งประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ (แต่เมื่อนำน้ำยางมาปั่นด้วยเครื่องเซนติฟิวจ์แล้ว ความแตกต่างจะลดลงเหลือเพียงประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์) โดยส่วนประกอบในน้ำยางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

### 1) ส่วนของเนื้อยางแห้งประกอบด้วย

1.1) อนุภาคยาง ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวก โปรตีนและไขมัน โดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอกและอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดง ปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อย ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยอยู่ แต่เมื่อนำน้ำยางมาปั่นด้วยความเร็วสูงพบว่า อนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากน้ำอยู่ด้านบน เรียกว่าน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง ซึ่งสามารถแยกออกโดยการจับตัวเป็นก้อนด้วยกรด

1.2) โปรตีน สารพวกโปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยาง มีอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง ส่วนที่เหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะอยู่ในชั้นน้ำและที่เหลืออีก 25 เปอร์เซ็นต์ จะปนอยู่ในชั้นของลูทอยด์ โปรตีนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่เป็น โปรตีนประเภทแอลฟาไกลูบูลินและฮีวิน โปรตีนบนผิวอนุภาคของยางนี้มีส่วนประกอบของกำมะถัน (Cystine Disulphide Linkage) อยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ จะเกิดการบดเน่า โดยโปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวก ไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารเมอร์แคปแทนทำให้เกิดกลิ่นเหม็นขึ้น



1.3) ไขมัน จะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็น สารพวกฟอสโฟไลปิดชนิด  $\alpha$ -Lecithin เชื่อว่ามีหน้าที่ยึดโปรตีนให้อยู่บนผิวอนุภาคยาง น้ำยางใน ภาวะที่เป็นด่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ (ประมาณ 0.6 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป) ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว ซึ่งรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้น้ำยางมีความเสถียรมากขึ้น แต่หากมีปริมาณแอมโมเนียน้อย (ประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์) การไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยางจึงจำเป็นต้องเพิ่มสบู่ หรือสารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษาน้ำยางเพิ่มลงไป

## 2) ส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง

### 2.1) ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม

เซรัม (Serum) ของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02

กรัมต่อมิลลิลิตรประกอบสารชนิดต่างๆ คือ

- คาร์โบไฮเดรตเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาลมีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาซิโทล มีน้ำตาลชนิดกลูโคส ซูโครส และฟรุกโตสปริมาณเล็กน้อย น้ำตาลเหล่านี้จะถูกพวกแบคทีเรียใช้เป็นอาหาร เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายตัวให้ กรด โมลกุลที่มีขนาดเล็กๆ ทำให้น้ำยางเกิดการเสถียรภาพและรวมตัวกันเป็นก้อน กรดเหล่านี้เป็นกรดที่ระเหยได้ง่ายจึงเรียกว่า VFA (Volatile Fatty Acid) ประกอบด้วยกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดโพรไพโนอิก เป็นต้น จึงนิยมใช้ค่า VFA เป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสภาพของน้ำยาง โดยมาตรฐานสากลของน้ำยางชั้น กำหนดให้มีค่า VFA ไม่เกิน 0.2 หน่วย

- โปรตีนและกรดอะมิโน เป็นส่วนที่อยู่ในเซรัมของน้ำยาง มีค่า Isoelectric Point สูง สามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้ เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพโปรตีนที่พบส่วนใหญ่เป็นประเภทอัลฟาไกลูโบลิน ซึ่งทำให้สารตรงผิวโมเลกุลมีความว่องไว

โดยทั่วไปจึงอยู่บริเวณรอยเชื่อมต่อของน้ำกับอากาศและน้ำมันกับน้ำ

## 2.2) ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ

2.2.1) ลูทอยด์ เป็นอนุภาคค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 ถึง 3 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเยื่อต่างๆ ภายในเยื่อต่างๆ นี้ มีทั้งสารละลายและสารแขวนลอย มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ 2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีส่วนของสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมีสารพวกพอลิฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลืองหรือ สีดำน้เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ

ลูทอยด์ถูกห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียว สามารถเกิดการออสโมซิสได้ง่าย ดังนั้น การเติมน้ำลงในน้ำยางสด จะทำให้ลูทอยด์เกิดการบวมและแตกได้ง่าย ขณะที่ลูทอยด์เกิดการพองตัวมีผลทำให้น้ำยางเกิดความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อลูทอยด์แตกความหนืดจะลดลง ในสภาพของอากาศร้อน อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ลูทอยด์แตกของเหลวภายในซึ่งเป็นสารแขวนลอยที่มีประจุบวกและไอออนของโลหะหนัก เช่น แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน จะป็นอยู่รวมกันอยู่ในเซรุ่ม ทำให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวกัน ก่อให้เกิดการอุดตันของท่อน้ำยาง มีผลทำให้น้ำยางหยุดไหลหลังกรี๊ด ส่วนเนื้อเยื่อของลูทอยด์ที่แตกออก มีรูปร่างไม่แน่นอน จะเกิดการจับตัวกันเองเป็นก้อน ติดอยู่บนผิวของอนุภาคยาง ทำใหยางมีขนาดโตขึ้นและเคลื่อนที่ได้ช้าลง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำยางเกิดการเสียดสภาพได้ หากเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางสด จะพบว่าส่วนของลูทอยด์และสารพวกโลหะแมกนีเซียมจะรวมตัวกับแอมโมเนีย เกิดการตกตะกอนเป็นตะกอนน้ำตาลและสีม่วง แยกตัวออกจากเนื้อยางเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างทำให้สามารถแยกออกมาได้

2.2.2) อนุภาคเฟรย์-วิสลิง เป็นสารที่ไม่ใช่ยาง มีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีปริมาณไม่

มากนัก ประกอบด้วย สารเมดิคัลพวกคาโรตินอยด์ ซึ่งทำให้น้ำยางมีสีเหลืองเข้ม สามารถรวมตัวกับ แอมโมเนียแล้วแยกตัวออกจากยางอยู่ในส่วนของเซรุ่ม

หากนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูงประมาณ 20,000 รอบต่อนาที จะสามารถแยก น้ำยางออกได้เป็น 4 ส่วน เรียงจากด้านบนถึงด้านล่างดังนี้

1.) ส่วนของเนือยาง อยู่ด้านบนสุด มีลักษณะเป็นครีมสีขาว เป็นอนุภาคของ ยางอาจมีของแข็งอื่น เช่น อนุมูลของโลหะอื่นเจือปนอยู่บ้างเล็กน้อย

1.) อนุภาคเพรย์-วิสลิง มักติดอยู่กับเนือยางมีลักษณะเป็นอนุภาค เช่นเดียวกับยางแต่มีสีเหลืองเวลาปั่นมักอยู่ในส่วนของเซรุ่ม

2.) เซรุ่ม จะมีสีใสปนเหลือง เป็นฟองได้ง่าย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย โปรตีน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม ทองแดง และแมกนีเซียม

3.) ตะกอนสีเหลืองหรือขาว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารพวกลูทอยด์ จะอยู่ล่างสุด ส่วนใหญ่เป็นสารโลหะหนักพวก แมกนีเซียม ฟอสฟอรัสและจี้เด้า (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, 2541)

### 2.3 โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมี ค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ เช่น ตะกั่วปรอท นิกเกิล แคดเมียม สังกะสี เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะถูกปล่อยออกจาก โรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกัน โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มี สถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันคือ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่นบางได้และสะท้อนแสงได้ดี ส่วน สมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนัก จึงมีความสามารถในการ



รวมตัวกับสารอื่นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่า โลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกันสารประกอบอินทรีย์ซึ่งสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร และเมื่อโลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศและผลผลิตทางการเกษตร ก็จะสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

โดยทั่วไปสามารถแบ่งโลหะหนักต่างๆออกตามสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น

4 ประเภทคือ

- โลหะหนักที่มีคุณสมบัติพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก ทองแดง เป็นต้น
- โลหะหนักที่ไม่ก่อพิษและโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อะลูมิเนียม
- โลหะหนักที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่นปรอท ตะกั่ว สารหนู

เป็นต้น

- โลหะหนักที่ก่อพิษอันตรายถ้าสิ่งมีชีวิตหากได้รับเพียงเล็กน้อย แต่ให้โทษถ้า

ได้รับในปริมาณมาก

ในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาถึงโลหะหนักเพียง 2 ชนิด คือ ตะกั่วและแคดเมียม เนื่องจากโลหะหนักทั้ง 2 ประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆอย่างมากมาย และด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการกระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและสะสมในสิ่งมีชีวิตและห่วงโซ่อาหารเป็นจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3.1 ตะกั่ว

#### 2.3.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง มีน้ำหนักอะตอม 207.2 เลขอะตอม 82 ในตารางธาตุ เป็นโลหะทรานซิชัน มีความถ่วงจำเพาะ 11.34 จุดหลอมเหลว 327.5 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 1740 องศาเซลเซียส ที่ความดันปกติ ในธรรมชาติที่พบมากมีอยู่ 4 ไอโซโทป ได้แก่ 208, 206, 207 และ 204 (World Health Organization, 1977 อ้างถึงใน มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) มีสมบัติโดยทั่วไป คือ อ่อนหลอมเหลวได้ เปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการรีดคัต หรือตีสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิสูงๆ (กองชื้ออนามัย กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2522. อ้างถึงใน มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) ตะกั่วมีสีเทาหรือดำเมื่ออยู่ในรูปไดออกไซด์ และมีสีเหลืองหรือส้มเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์ แต่โดยทั่วไปจะอยู่มีสีขาวหรือไม่มีสี พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ แร่ตะกั่วที่สำคัญคือ ตะกั่วซัลไฟด์ (Galena, PbS) รองลงมาคือ ตะกั่วคาร์บอเนต (Cerussite, PbCO<sub>3</sub>) และตะกั่วซัลเฟต (Anglesite, PbSO<sub>4</sub>) สำหรับแร่ตะกั่วซัลไฟด์มีปริมาณตะกั่วถึงร้อยละ 86.6 กำมะถันร้อยละ 13.4 ถ้าเป็นผลึกมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าๆ ถ้าผลึกละเอียดมากจะแลดูระยิบระยับ มีสีผงละเอียด สีเทา ตะกั่วเนื้อค่อนข้างอ่อน มีความแข็งประมาณ 2.5-3

สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว (Pb<sup>2+</sup>) พบที่ตะกั่วซัลไฟด์และตะกั่วออกไซด์ มักไม่ละลายน้ำยกเว้นที่อยู่ในรูปของไนเตรต คลอไรด์และคลอไรด์ นอกจากนี้เกลือของตะกั่วบางชนิดอาจอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ เช่น ตะกั่วออกซาเลต (Lead Oxalate) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ (World Health Organization, 1981. อ้างถึงใน มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) ในเปลือกโลกตะกั่วในพื้นดินอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือเกิดขึ้นจากภาวะมลพิษ ดินที่มีสภาพเป็นกรดจะมีตะกั่วสะสมอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าดินที่มีสภาพเป็นด่าง เนื่องจากอนินทรีย์สารในดินอาจทำ

ปฏิกิริยากับสารตะกั่วที่มีอยู่ สารตะกั่วในบรรยากาศมาจากตะกั่วที่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อช่วยในการจุดระเบิด ซึ่งเป็นตะกั่วที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ จากมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ก.)

### 2.3.1.2 พิษของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นพิษต่อร่างกายถึง 4 ระบบคือ

- 1) ระบบประสาทส่วนกลาง ตะกั่วอินทรีย์ทั้งที่รับเข้าไปทั้งแบบเรื้อรัง และกึ่งเฉียบพลัน ทำให้เกิดอาการสมองเสื่อม ผู้ป่วยมีอาการมึนงง นอนไม่หลับ ตื่นตระหนก ปวดศีรษะ กล้ามเนื้อสั่นและความจำเสื่อม ถ้าเป็นมากผู้ป่วยจะชักและตายได้ ส่วนพิษตกค้างทำให้เกิดน้ำคั่งในสมอง เป็นลมบ้าหมูและปัญญาทึบ ในเด็กแม่ได้รับในปริมาณไม่มากก็ทำให้เกิดอาการสมองเสื่อม ส่วนตะกั่วอินทรีย์มีผลต่อจิตใจ ทำให้เกิดอาการประสาทหลอน ตื่นเต้น
- 2) ระบบประสาทส่วนขอบ ตะกั่วทำให้กล้ามเนื้อไม่มีแรง เกิดอาการเพื่อฝืนและทำให้ลักษณะทางกายภาพของเซลล์ประสาทผิดปกติไป
- 3) ระบบเลือด ทำให้เกิดอาการของโรคโลหิตจาง เนื่องมาจากการที่เม็ดเลือดแดงมีอายุสั้นลง และการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินของร่างกายถูกขัดขวาง โดยตะกั่วเข้าไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่ควบคุมการถ่ายเทโพแตสเซียมและโซเดียมที่ผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์บางลง เซลล์เม็ดเลือดแดงจึงแตกและถูกฉีกขาดได้ง่าย
- 4) ไต ตะกั่วจะสะสมในส่วนของพรอกซิมอลทิวบูลในไตเป็นส่วนใหญ่ ถ้าพรอกซิมอลทิวบูลถูกทำลาย จะทำให้กลูโคส กรดอะมิโนและฟอสเฟตไม่ถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายตามปกติ ทำให้ร่างกายสูญเสียสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายไปได้แต่อาการดังกล่าว



สามารถรักษาให้หายได้โดยการให้ยา

### 2.3.1.3 ประโยชน์ของตะกั่ว

- 1) ใช้ในทางโลหะกรรม โดยผสมกับโลหะต่างๆ เพื่อใช้เป็นโลหะผสม เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้ทำหัวลูกปืน ทำระฆัง แบตเตอรี่ ตะกั่วบัดกรี และใช้ใน อุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น
- 2) ใช้ในอุตสาหกรรมทำสีต่างๆ โดยใช้ตะกั่วออกไซด์เป็นส่วนประกอบ อุตสาหกรรมเคมีและใช้ในการเคลือบภาชนะดินเผาให้สวยงาม
- 3) ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตท่อส่งน้ำ โดยเฉพาะท่อพีวีซี
- 4) ใช้ในการเกษตรกรรมโดยผสมในยาปราบศัตรูพืช

## 2.3.2 แคดเมียม

### 2.3.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีความสามารถอ่อนตัวได้ มีสีเงินวาวและสามารถรับประจุไฟฟ้าบวก มีน้ำหนักอะตอม 112.41 มีวาเลนซ์ 0, 2 และมีจุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 765 องศาเซลเซียส โดยแคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนมากมักปนกับแร่สังกะสี ทองแดงและแร่ดีบุก ปกติในธรรมชาติจะรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมจะละลายในกรด โดยเฉพาะกรดซัลฟิวริก แม้ว่าแคดเมียมจะมีปริมาณน้อยในธรรมชาติ แต่เป็นพิษอย่างมากกับสิ่งมีชีวิต เพียงปริมาณน้อยก็เป็น

อันตราย ในอากาศไม่ควรเกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ก.)

### 2.3.2.2 พิษของแคดเมียม

แคดเมียมมีฤทธิ์ทำลายไต ระบบทางเดินหายใจและปอด ทั้งยังมีผลต่อการสะสมแคดเมียมในร่างกายด้วย

1) ปอด หลังจากผู้ป่วยได้รับแคดเมียมเข้าไป 2-3 ชั่วโมง ผู้ป่วยจะมีอาการบวมน้ำ เจ็บหน้าอก คลื่นไส้และท้องเดิน ถ้าได้รับติดต่อกันไปนานๆ ประสิทธิภาพในการระบายลมของปอดจะลดลง ซึ่งเป็นอาการที่รุนแรงกว่าการได้รับแคดเมียมแบบเฉียบพลันทีละมากๆ

2) ไต ผู้ป่วยที่ได้รับแคดเมียมทางปากจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดินเป็นตะคริวที่ท้อง และอาจตายภายใน 24 ชั่วโมง หากเสียน้ำมาก โดยจะขับโปรตีนออกมาในปัสสาวะมากกว่าปกติ

3) กระดูก ทำให้กระดูกโกร่ง แตกร้าว เนื่องจากร่างกายดูดซึมแคดเมียมได้น้อยลงนั่นเอง

4) อื่นๆ ได้แก่ ผลที่เกิดกับหลอดเลือดคือ ถ้าได้รับในปริมาณน้อยๆ จะทำให้เกิดการบีบตัวของหลอดเลือด แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากๆจะทำให้หลอดเลือดบวมได้ (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544)

## 2.4 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธีดังต่อไปนี้ได้แก่

### 2.4.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากวิธีหนึ่ง ทำโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เพื่อให้ได้ตะกอนที่สามารถแยกออกได้ การตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธี แต่ที่นิยมก็คือ

#### 2.4.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม ทำโดยการเติมปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรืออาจเติม โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย  $M^{2+}$  คือโลหะไอออน

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายชนิดด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ โลหะไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงพีเอชกว้างๆ โดยทั่วไปโลหะจะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช ประมาณ 8 - 11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าพีเอชเปลี่ยนไปจากพีเอชที่ตกตะกอน



### 2.4.1.2 การตกผลึกซัลไฟด์

จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{NaHS}$ ) หรือเฟอร์รัสซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย  $\text{M}^{2+}$  คือโลหะไอออน

ข้อดีของการตกผลึกซัลไฟด์ คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อจำกัดเรื่องกลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

### 2.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด จะสามารถถูกดูดซับโดยเรซินแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น โดยที่ผิวของเรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย

วิธีนี้เหมาะสมกับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้ามี

สารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ต้องกำจัดออกก่อนที่จะเข้าถังเรซินเพื่อทำการบำบัดให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง

#### 2.4.3 รีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสีย โดยหลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรน ที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซิเตตและพอลิเอไมด์ ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) โดยจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศ ดังนั้น แผ่นที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น โดยการปรับค่าพีเอชแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ (ศุภกิจ พัฒนเดชะ, 2545)

#### 2.4.4 โคลแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน (Coagulation/Flocculation)

เป็นกระบวนการที่รู้จักกันดีว่าสามารถจับโลหะจากสารละลายได้โดยโคลแอกกูเลชันใช้หลักการกระตุ้นประจุไฟฟ้าบนอนุภาค ส่วนฟล็อกกูเลชันใช้หลักการกวนอย่างช้าๆเพื่อให้ อนุภาคจับตัวกันเป็นก้อน โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟล็อกกูเลชัน ส่วนใหญ่คือเฟอริกซัลเฟต (Ferric Sulfate) หรือ อะลัม (Alum) ซึ่งโลหะที่กำจัดได้เป็นพวก ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม โดยในการกำจัดแคดเมียมใช้ในช่วงพีเอชที่ 8.5 – 11.3 จะมีประสิทธิภาพมากกว่า ร้อยละ 98 ถ้าใช้ อะลัม (Alum) ต้องคำนึงถึงความขุ่นน้ำทิ้งด้วย แต่ถ้าเป็นการกำจัดตะกั่วการใช้เฟอริกซัลเฟต (Ferric Sulfate) จะมีประสิทธิภาพร้อยละ 97 ส่วนการใช้ อะลัม (Alum) จะมี

ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 80 – 90 แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำทิ้งด้วย

#### 2.4.5 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบ โลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดการรีดักชัน ได้แก่ ไฮร่อน (II) ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่พีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟิวริกลงไปด้วย จากนั้น เติมน้ำไลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องมีค่าพีเอชที่เหมาะสมปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

#### 2.4.6 การระเหย

เป็นวิธีการที่ง่ายใช้ในการทำให้สารเคมีมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดาและระเหยภายใต้สุญญากาศ วิธีการบำบัดเช่นนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

#### 2.4.7 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีนี้เป็น การแลกเปลี่ยน ไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย น้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อ ป้องกัน การอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่ ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและการดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิด ของไอออนที่ต้องการได้

#### 2.4.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ใน สารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะ สำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลือง พลังงานไฟฟ้าสูงมาก

#### 2.4.9 การบำบัดโดยจุลินทรีย์ (Biological Treatment)

เป็นการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก เช่น จากกระบวนการ แอคติเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสีและโครเมียม ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง ในเงื่อนไขที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



#### 2.4.10 การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กมากๆ จนถึงระดับ โมเลกุล สารดูดติดผิวที่นิยมใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือ โครงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุด รูพรุนหรือ โครงมีขนาดตั้งแต่ 20 ถึง 20,000 อังสตรอม การสังเคราะห์คาร์บอนชนิดนี้ทำได้โดยการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ จากนั้นจึงเผาวัตถุดิบที่แห้งให้เป็นถ่าน (Carbonization) ที่อุณหภูมิประมาณ 400 – 600 องศาเซลเซียส คาร์บอนที่ได้ยังมีความสามารถในการดูดติดผิวได้ต่ำ เนื่องจากโครงภายในคาร์บอนยังมี Tar อุดตันอยู่ คาร์บอนนี้จึงต้องเผาต่อที่อุณหภูมิประมาณ 750 – 950 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อไล่ทาร์ (Tar) ออกให้หมด (ขั้นตอนนี้เรียกว่า Activation) จึงจะได้ แอคติเวเตดสถิตซ์ (Activated Carbon) เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถทำให้ Activated Carbon หนัก 1 กรัม มีพื้นที่ผิวประมาณ 600 – 1,000 ตารางเมตร กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้เช่นกัน โดยของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) และไอออนโลหะหนักที่ถูกจับโดย ตัวดูดซับ (Adsorbent) เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดเมื่อ โมเลกุลในของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว โดยสารดูดติดผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

##### 2.4.10.1 ประเภทสารอนินทรีย์

เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอคติเวเตดซิลิกา เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่การสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ สามารถจับ โมเลกุลของคอลลอยด์ได้

เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์เป็นไปอย่างจำกัด

#### 2.4.10.2 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์

เช่น สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษหรือสารเรซินที่สังเคราะห์ขึ้นมา โดยสารเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) แต่มีข้อดีคือสามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายมากและสิ้นเปลืองน้อยกว่า

#### 2.4.10.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

คาร์บอนชนิดนี้ อาจจัดได้ว่าเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้แต่เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ที่ใช้แล้วยังสามารถนำมาทำฟื้นฟูสภาพ โดย นำ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ไปทำให้แห้งและนำไปอบจนแห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 950 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น จากนั้นนำคาร์บอนไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในถังน้ำเย็นและล้างส่วนที่เป็นฝุ่นออกเพื่อนำไปใช้อีกครั้ง (ณัฐ ดิลกเกียรติ, 2546)

## 2.5 กลไกการดูดติดผิวหรือการดูดซับ

การติดผิวหรือดูดซับ เป็นกระบวนการที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายหรือก๊าซ โดยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) กับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยทั่วไปมีกลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงสารดูดซับ ที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลว เข้าถึงผิวหน้าของสารดูดซับ
- การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกที่ตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดติดผิว
- ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่ง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของสารดูดติดผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก

### 2.5.1 ลักษณะการดูดซับ

องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายตัวบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับผิวได้แตกต่างกัน จึงสามารถแบ่งลักษณะการดูดซับออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

#### 2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับ ที่ไม่เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันและไม่มีการถ่ายเท

อิเล็กทรอนิกส์ แต่การดูดซับเกิดจากการสัมผัสกันเฉพาะตัว (Individuality of Interaction Species) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันอย่างเบาบางคือ แรงแวนเดอวาล์ว (Van der Waals Forces) การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า การดูดซับแวนเดอวาล์ว (Van der Waal's Adsorption) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Cohesion) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Forces) นั่นเอง การดึงดูดกันด้วยแรงที่อ่อน จึงทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการคายความร้อนค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 0.5 -5 กิโลแคลอรีต่อโมล และเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ทั้งหมด นั่นก็คือการหลุดออกของสารถูกดูดซับจากสารดูดซับ นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพนี้จะไม่มีการจำเพาะ (Specific Site) กล่าวคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีความอิสระที่จะถูกดูดซับบนตำแหน่งใดๆ ก็ได้บนผิวสารดูดซับ

### 2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปมา ระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของสารดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นมา โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเลือกบริเวณที่เกิดการดูดซับได้ และจะเกิดในลักษณะโมโนเลเยอร์เท่านั้น ทำให้เกิดการคายความร้อนในปริมาณที่สูงคือ ในช่วง 5 – 100 กิโลแคลอรีต่อโมล หมายความว่า การหลุดออก (Desorption) ของการดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นได้น้อยมาก จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible Interaction) ซึ่งโดยปกติเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ จะทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดสามารถเปรียบเทียบการดูดซับทั้ง 2 ประเภท ดังตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีกับการดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
คายพลังงาน 5 – 100 กิโลแคลอรีต่อโมล	คายพลังงาน 0.5 – 5 กิโลแคลอรีต่อโมล
เกิดสารประกอบทางเคมี	ปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้า
การหลุดออกยาก	การหลุดออกง่าย
ปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้	ปฏิกิริยาผันกลับได้

### 2.5.2 สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

สมดุลการดูดติดผิว เกิดเมื่ออัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจากผิวเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่จุดสมดุลจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุล โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายอุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว

#### 2.5.2.1 การวิเคราะห์ระบบดูดซับ

ระบบดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ซึ่งจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ การวิเคราะห์ระบบดูดซับ ได้มีผู้วิเคราะห์เอาไว้ 3 กลุ่มคือ Langmuir, Brunauer-Emmett-Teller (BET), Freundlich

สมการที่ 2 – 1 แสดงสมการของ Langmuir โดยสมการมีเงื่อนไขว่า การ

ดูดซับจะคิดเฉพาะผิวชั้นเดียว และ โมเลกุลของสารดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนพื้นผิว

$$q = q_m K_A C / (1 + K_A C) \dots \dots \dots 2-1$$

เมื่อ  $q$  = ปริมาณของสารดูดซับ / ปริมาณของตัวดูดซับ

$q_m$  = ปริมาณของสารดูดซับ / ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

$K_A$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ,  
(ลิตรของตัวดูดซับ / มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับ)

$C$  = ความเข้มข้นของสารละลาย, มิลลิกรัม / ลิตร

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $q_m$  และ  $K_A$  ได้ด้วยวิธีวาดกราฟ จึง

จำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ 2-2 และ 2-3

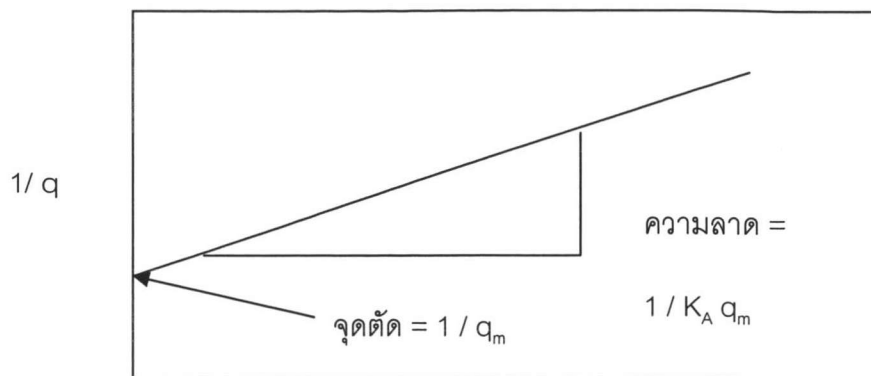
$$1/q = (1/q_m) + (1/K_A q_m)(1/C) \dots \dots \dots 2-2$$

$$C/q = (C/q_m) + (1/K_A q_m) \dots \dots \dots 2-3$$

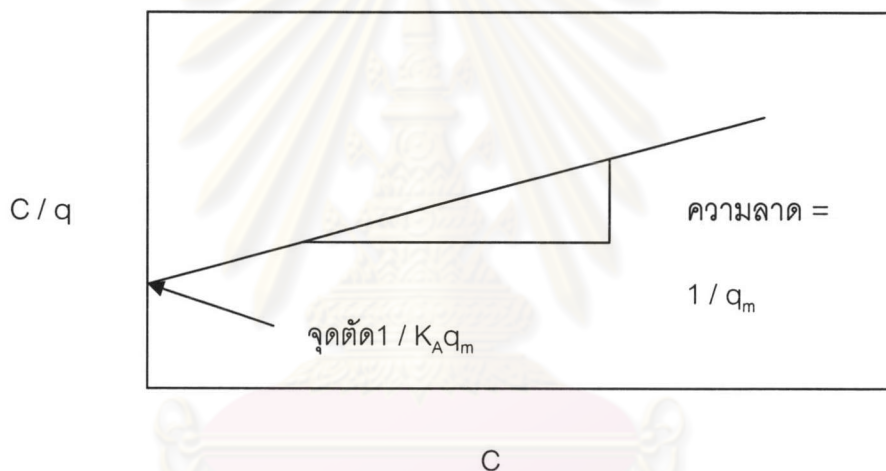
จากสมการที่ 2-2 และ 2-3 สามารถวาดกราฟได้ดังรูปที่ 2.1 และ

2.2

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของ 1/C และ 1/q ของ Langmuir



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของ C และ C/q ของ Langmuir

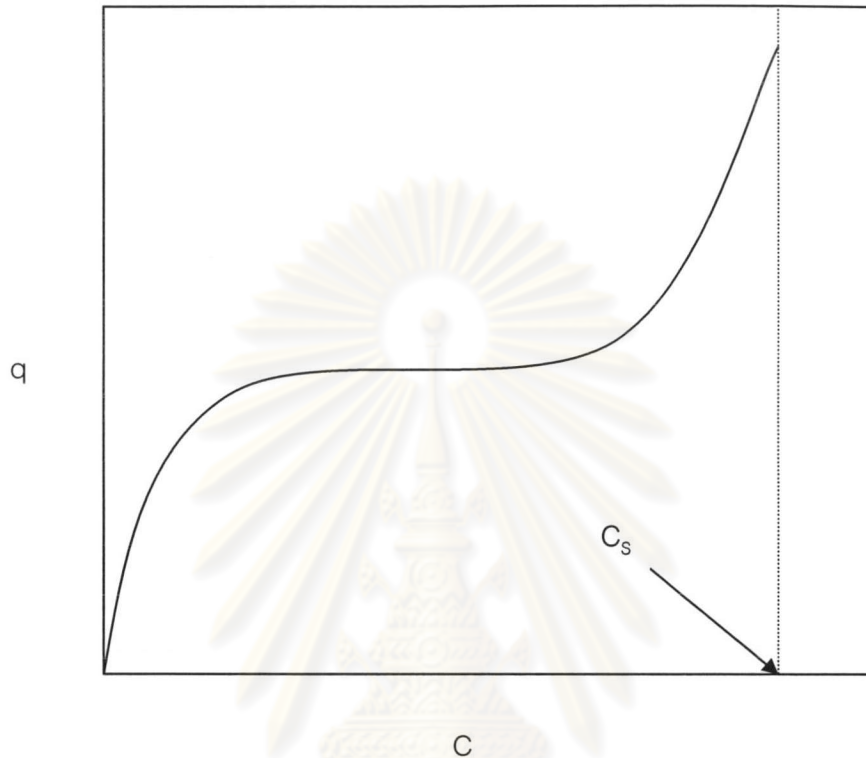
สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) สมการที่ 2 – 4 ได้แสดง สมการของ BET สำหรับระบบการดูดซับ โดยมีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิวและระดับการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุกๆ โมเลกุล

$$q = q_m K_B C / (C_s - C) [1 + (K_B - 1)(C / C_s)] \dots \dots \dots 2 - 4$$

เมื่อ  $C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ, มิลลิกรัมต่อลิตร

(ซึ่งจะสามารถหาค่า  $C_s$  ได้จากกราฟรูปที่ 2.3)

$K_B$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของ C และ q ตามสมการ BET

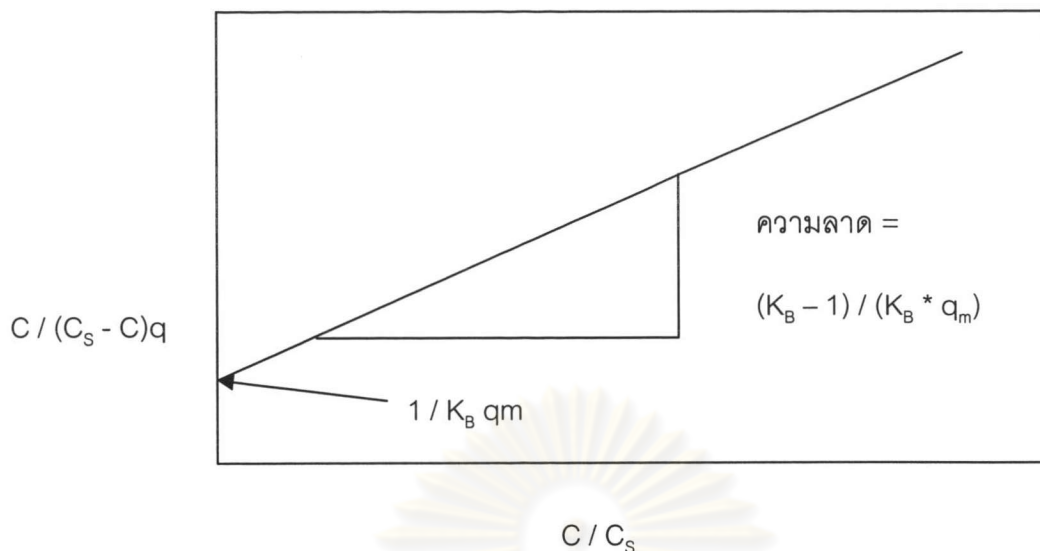
เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $K_B$  และ  $q_m$  ได้โดยการวาดกราฟ จึง

จำเป็นต้องจัดรูปสมการใหม่เป็นสมการที่ 2-5

$$C / (C_s - C)q = (1 / K_B q_m) + [(K_B - 1) / (K_B * q_m)] (C / C_s) \dots \dots \dots 2-5$$

จากสมการที่ 2-5 สามารถวาดกราฟได้ดังรูป 2-4





รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของ  $C / C_s$  และ  $C / (C_s - C)q$  ตามสมการของ BET

สมการของ Freundlich สมการที่ 2-6 สำหรับระบบดูดซับ ซึ่งสมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

$$q = K_F C^{1/n} \dots\dots\dots 2-6$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

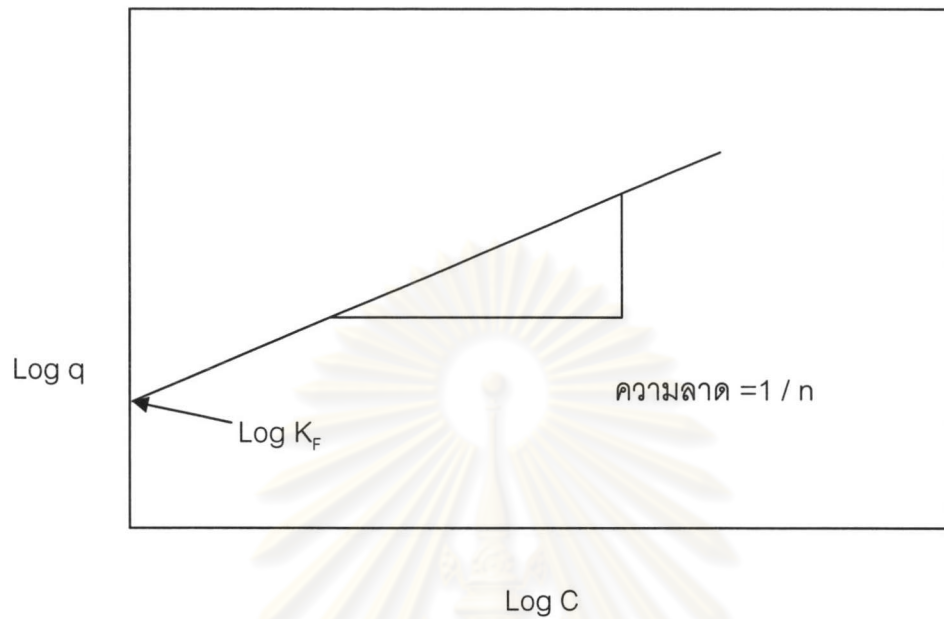
เมื่อ  $K_F$  = ค่าคงที่  
 $n$  = ค่าคงที่

เพื่อให้คำนวณค่าคงที่  $K_F$  และ  $n$  ได้จากกราฟ จึงใช้ Logarithm มาจัด

รูปสมการใหม่เป็นสมการที่ 2-7

$$\log q = (\log K_F) + (1/n)(\log C) \dots\dots\dots 2-7$$

จากสมการที่ 2 – 7 สามารถวาดกราฟได้ดังรูปที่ 2 - 5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของ Log C และ Log q ของ Freundlich

### 2.5.2.2 ระบบการดูดซับแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch)

ระบบการดูดซับแบบแบตช์ เป็นการใช้อ่างดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสียในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาที่ใช้อาจจะยาวนานหรือสั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ความเข้มข้นของตะกอน ขนาดของอ่างดูดซับและการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารปนเปื้อน

## 2.5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

### 2.5.3.1 ความดันป้อน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งขึ้นอยู่กับความดันป้อนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป้อนต่ำ พิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนของโมเลกุลสารถูกดูดซับที่เข้าหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความดันป้อนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้ โมเลกุลสารถูกดูดซับ สามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ทำให้เกิด Pore Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

### 2.5.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับ เป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับนั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive Capacity) นั่นคือสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูด โมเลกุลสารถูกดูดซับ ได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

### 2.5.3.3 ความสามารถการละลายของสารที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลสารถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากรน้ำและไป

เกาะติดกับผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจสรุปว่ามีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำ

#### 2.5.3.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

จากรายงานการวิจัยพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงของสารดูดซับเล็กน้อย (พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารดูดซับและสารดูดซับมีค่ามากที่สุด ซึ่งโดยปกติโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้น โมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไป

#### 2.5.3.5 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน เนื่องจากค่าพีเอชต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าค่าพีเอชสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลของสารดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่เป็นสารละลายไอออนในสารละลาย ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแก่งแย่งกันที่จะดูดซับไอออนในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งทำให้ได้ผลในทางตรงกันข้ามกับเมื่อเป็นการดูดซับในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงๆ นอกจากนี้ ค่าพีเอชยังมีผล



ต่อการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซึม

### 2.5.3.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซึม กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซึม มีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (กิตตินันท์ คงสืบ ชาติ, 2546)

## 2.6 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์หมายถึง สารดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผงหรือเม็ดก็ได้ ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือก๊าซ โดยทั่วไปมีลักษณะดังนี้

- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก
- มีพื้นที่ผิวมาก
- มีความจุในการดูดซับสูง
- มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก

การผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ โดยส่วนใหญ่วัตถุดิบที่นำมาใช้มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ (สารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ) เป็นส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ เช่น พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท เป็นต้น และพวกที่เป็นส่วนต่างๆ ของสัตว์ เช่น เลือด กระดูก เป็นต้น

นอกจากนี้ วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ชานอ้อย กากหนัง เมล็ดพืช กะลามะพร้าว

ไม้ ซี้เลื้อย กากน้ำตาล ของเสียจากเชื้อกระดาษ ของเสียจากยาง เป็นต้น ในปัจจุบันได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์อย่างมาก

สำหรับวัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่านมักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์อินทรีย์วัตถุ หรือที่เรียกว่าถ่านสังเคราะห์ (Artificial Char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Char) เช่น ถ่านหินก็ได้

ถ่านสังเคราะห์สามารถแบ่งตามอินทรีย์วัตถุที่ใช้ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ถ่านสังเคราะห์เนื้อแข็ง (Hard Artificial Char) เช่น ถ่านหินน้ำตาล ถ่านไม้ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ที่ความดันสูง
2. ถ่านสังเคราะห์เนื้ออ่อน (Soft Artificial Char) เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านหินน้ำมัน กากน้ำตาล เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ อาจนำไปคาร์บอไนซ์ก่อนเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น อนึ่งสมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ วิธีการผลิต สภาพที่ใช้ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุว่าวัสดุชนิดใด ควรใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

### 2.6.1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบคืออะไร ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 2 ขั้นตอนคือ การคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) การกระตุ้น (Activation)

### 2.6.1.1 การคาร์บอนไนเซชัน

เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และก๊าซ อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น

การไพโรไลซิสแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะทำให้เกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ (Local Equilibrium) โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (Temperature History) ส่วนไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

### 2.6.1.2 การกระตุ้น

คือการทำให้ถ่านหรือคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับได้สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น สามารถแบ่งการกระตุ้นได้ตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท

1) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) นอกจากนี้ยังมี แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี

ดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน

2) การกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ฯลฯ ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ อิมตัวยิงยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิบัติการกระตุ้นอาจเกิดความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องให้อุณหภูมิสูงมากถึง 1200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 – 1200 องศาเซลเซียส)

ในกระบวนการกระตุ้นคาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอนเกิดก๊าซซิฟิเคชัน บางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นใน โครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆจำนวนมาก เกิดช่องว่างระหว่างผลึกในการจะเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนเหล่านี้มักบรรจุไปด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขวางด้วยอมฟิสคาร์บอน การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูที่ถูกปิดและสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

## 2.6.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆคือ



### 2.6.2.1 ตามชนิดของตัวกระตุ้น

- 1) เคมี (Chemical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวของคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่
- 2) ฟิสิกส์ (Physical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูขนาดเล็ก

### 2.6.2.2 ตามขนาดบนผิวรูพรุนบนผิวคาร์บอน

- 1) ขนาดเล็ก (Micropores) ขนาดของรัศมีน้อยกว่า 15 – 16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2 – 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมากหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัมบางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัมไมโครพอร์ มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับเนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption Energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ
  - 2) ขนาดกลาง (Transitional Pores หรือ Mesopores) ขนาดของรัศมีอยู่ระหว่าง 15 – 16 อังสตรอม ถึง 1,000 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม
  - 3) ขนาดใหญ่ (Macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นมาโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่มีขนาดเล็กกว่า
- เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกว่า การกระจายขนาด

ของรูพรุน (Pore Size Distribution) ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น

### 2.6.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

1) ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบหรือการให้น้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

2) ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดก๊าซพิษหรือไอระเหย

### 2.6.2.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

1) ก๊าซ (Gas Adsorbents) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษและไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และมีความแข็งแรง เป็นวัตถุดิบในการผลิต

2) สี (Color Adsorbents) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และไม่แข็ง

3) โลหะ (Metal Adsorbents) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกโลหะต่างๆ เช่น แยก ทอง เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

### 2.6.2.5 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon) ทำได้โดยเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นกับวิธีการบด ซึ่งจะมีผลทำให้สมบัติการ

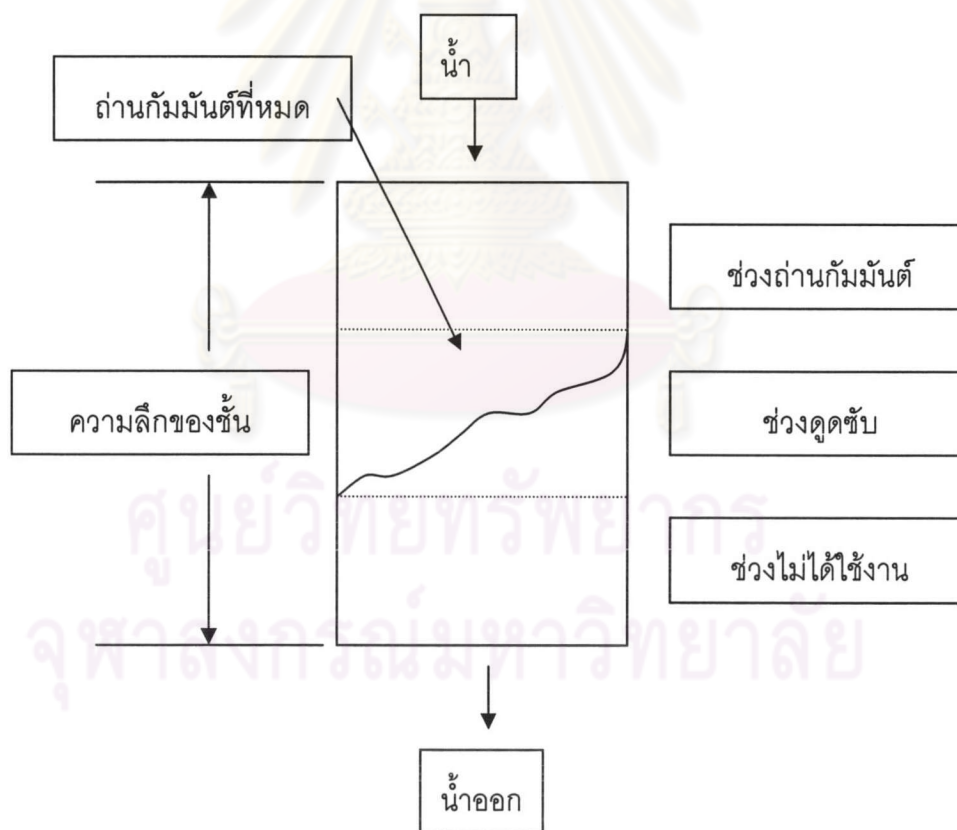
ดูดซับแตกต่างกันไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสภาวะที่เป็นของเหลวเป็นส่วนใหญ่โดยทั่วไปมีขนาด 5 – 100 ไมโครเมตร

2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหรือแบบผงมาทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน (Binding Agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์ แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ได้แก่ วัตถุดิบที่ค่อนข้างแข็งและมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษและไอของสารละลายอินทรีย์

## 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**มานัด แก้วถาวร (2537)** ศึกษาเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้สารกระตุ้น 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ ซิงก์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยสารทั้งสามชนิดนั้น ทำให้ถ่านมีสมบัติในการดูดซับดีขึ้นกว่าการใช้ถ่านธรรมดา การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นจาก 30-120 นาที ทำให้ถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน ( $I_2$ ) ดีขึ้น แต่ร้อยละของผลผลิตลดลงประมาณ 0.6-5.6 และเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การศึกษาขนาดกะลาพบว่า ขนาดกะลาที่เล็กลงทำให้ถ่านมีสมบัติในการดูดซับดีขึ้น แต่ค่าร้อยละผลผลิตลดลง ซึ่งอัตราส่วนของสารกระตุ้น คือ ซิงก์คลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ ต่อปริมาณกะลามะพร้าวที่เหมาะสม คือ 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800-900 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษากการใช้สารกระตุ้น พบว่าโซเดียมคลอไรด์เป็นสารกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าซิงก์คลอไรด์ แต่ซิงก์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นที่ดีแต่เป็นพิษ ต้องล้างออกก่อนนำไปใช้งาน เมื่อใช้แล้วจึงต้องพยายามนำกลับมาใช้ใหม่

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2539) กล่าวว่า พลวัตการใช้งานถ่านกัมมันต์ที่วางในถังดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงถ่านกัมมันต์หมดอายุ ช่วงดูดซับ และช่วงไม่ได้ใช้งาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 มีการกำหนดไว้ในระบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไว้ว่า หากค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของน้ำออกต่อความเข้มข้นของน้ำเข้า ( $C/C_0$ ) เท่ากับ 0.1 ที่จุดดังกล่าวควรทำการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ เพราะหากปล่อยต่อไปค่า  $C/C_0$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเท่ากับ 0.9 ทำให้ถ่านกัมมันต์หมดสภาพทั่วทั้งถังและอาจเกิดการคายสารออกได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงช่วงการทำงานของถ่านกัมมันต์ในระบบทดสอบแบบต่อเนื่อง



**ประภตุ เลิศจรัสอร่ามดี (2539)** ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า ขุยมะพร้าวที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถในการกำจัดไอออนของตะกั่ว และไอออนของปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ สามารถกำจัดได้ 80 เปอร์เซ็นต์ และ 78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ซีลีเนียมและฟางข้าว พบว่า ขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าซีลีเนียมและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3 – 0.7 ส่วนในล้านส่วน พบว่า ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าวสามารถกำจัดไอออนของตะกั่วได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์

**อริชัย นพแก้ว (2539)** ได้ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก กล่าวว่าถึงดูดซับแบบแท่งมีข้อดีเหนือกว่าการใช้ถ่านดูดซับแบบแบดจ์ คือ อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารดูดซับในสารละลาย ซึ่งตัวดูดซับจะสัมผัสชั้นของคาร์บอนในถังดูดซับแบบแท่งอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพจากส่วนบนก่อนและเริ่มหมดสภาพไต่ลงไปจนถึงด้านล่างของถัง ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ไหลที่ไหลออกด้านล่างของถัง ณ จุดที่ตัวดูดซับที่อยู่ด้านล่างของถังหมดสภาพ สังเกตได้จากในช่วงแรกของการบำบัด น้ำที่ไหลออกจากถังมีคุณภาพดีมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป คุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วจนตัวดูดซับไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก โดยความลึกของช่วงการดูดซับนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของสารดูดซับ ลักษณะการดูดซับ และปัจจัยทางชลศาสตร์ เช่น เมื่อสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นคาร์บอนด้วยอัตราการไหลเร็ว ทำให้เกิดช่วงการดูดซับที่กว้างทำให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออกอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามหากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นคาร์บอนอย่างช้าๆ ทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละน้อยจนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ซึ่งทำให้คาร์บอนถูกใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

**ไชยยันต์ ไชยยะ (2542)** ศึกษาปัจจัยการผลิตตัวดูดซับที่เตรียมจากดินกับกากกาแฟ พบว่าที่อัตราส่วนดินต่อกากกาแฟเท่ากับ 20 ต่อ 80 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับโลหะหนักพวกแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสีและนิกเกิล โดยการดูดซับโลหะหนักของเม็ดดูดซับขึ้นกับค่าพีเอชและอุณหภูมิโดยที่พีเอชสูงๆ ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

**ปิยะพร บารมี (2542)** ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์และกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) โดยศึกษาตัวแปรเรื่องเวลาและอุณหภูมิพบว่า ถ่านที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เป็นถ่านที่มีความเหมาะสมในการนำไปกระตุ้นต่อคือมีค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ 85.13 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.41 และปริมาณสารระเหยร้อยละ 22.08 โดยภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นคือที่อุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 54.96 พื้นที่ผิวร้อยละ 321.17 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 351.52 มิลลิกรัมต่อกรัม

**วราศรี เอกประสิทธิ์ และคณะ (2542)** ศึกษาคุณลักษณะของกากจี๊แป็งและอัตรา การเกิดกากจี๊แป็งของอุตสาหกรรมน้ำยางข้น โดยจี๊แป็งเกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่น (Centrifugation) ของกระบวนการผลิตน้ำยางข้น กากจี๊แป็งที่ได้มีสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน ในกระบวนการผลิต ก่อให้เกิดกากจี๊แป็งประมาณ 10.7 กิโลกรัมต่อ 1 ตันน้ำยางสด โดยในปัจจุบันโรงงานมักนำไปถมที่ ถมถนนซึ่งเป็นการจัดการที่ไม่เหมาะสม

**ชนิตา เสมรต์ถ์ (2543)** ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม สิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยสารดูดติดผิวที่ใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ ถ่านกะลา และถ่าน ชาน

อ้อย โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่า ถ่านกะลาไม่มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน โดยพิจารณาจากผลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดติดผิวแบบ ฟรูนดลิช ส่วนถ่านกัมมันต์และถ่านชานอ้อยมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งาน

**ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร (2543)** พบว่าการดูดซับสารละลายโลหะหนัก ตะกั่ว สังกะสี แคลเดียมและโครเมียม ด้วยตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ แร่ดินเหนียว kaolinite และ bentonite และ ดินเหนียวจากสถานที่ต่างๆ พบว่า เข้าสู่สมดุลของการดูดซับประมาณ 2 ชั่วโมง และเมื่อความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับต่างๆ ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพีเอชที่สูงขึ้น ทำให้ประจุที่ผิวของคอลลอยด์เป็นลบมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถดูดซับประจุบวกของโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าแร่ดินเหนียว bentonite สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด รองมาคือ แร่ดินเหนียว muscovite และแร่ดินเหนียว kaolinite ตามลำดับ โดยลำดับความสามารถในการถูกดูดซับจากมากไปน้อยดังนี้คือ  $Cr > Pb > Cd > Zn$  ยกเว้นแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ดูดซับตะกั่วได้สูงสุด

**ลลิตา นิตฺสนจารุกล (2544)** ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ เปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยทำการกระตุ้นด้วยเกลือแกง (NaCl) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาคือ 800 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักเกลือแกงต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1 ต่อ 1 และจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวคือพีเอชซึ่งพบว่าที่พีเอชมากกว่า 4 ขึ้นไปถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 90 และจากผลการหาไอโซเทอร์มการดูดติดผิวแบบฟรูนดลิชพบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์



**สุภณีย์ คัญเสงี่ยม (2544)** เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว โดยใช้เกลือแกง (NaCl) เป็นตัวกระตุ้นเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดจากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวมีค่าการดูดซับไอโอดีน 532.29 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 492.42 ตารางเมตรต่อกรัมและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 486.45 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวเท่ากับ 385.90 ตารางเมตรต่อกรัมและการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านกะลามะพร้าวมีสมบัติที่ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม

**ปนัดดา คำรัตน์ (2545)** ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากขี้เียง โดยใช้เกลือแกง (NaCl) เป็นตัวกระตุ้นในขั้นตอนการเตรียมถ่าน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 510 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 566.39 ตารางเมตรต่อกรัม จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชพบว่า มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 116.18 และ 18.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

**มานพ ตีระรัตนสมโภช (2545)** พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้เียงที่เหมาะสมคือ การกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ เผาที่ 800 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ เผาที่ 700 องศาเซลเซียส ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 519.4 และ 1021.3 ตามลำดับ การทดลองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยคอลัมน์ที่ระดับความลึกของถ่านกัมมันต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าจุด Breakthrough สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.21, 14.17, 186.04 และ 209.17 ลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย



โซเดียมคลอไรด์ และได้เท่ากับ 4.0, 21.5, 337.25 และ 829.5 ลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ ตามลำดับ

**กิตตินันท์ กงสืบชาติ (2546)** ศึกษาปัจจัยการผลิตดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและซีลี้อย พบว่าน้ำหนักระหว่างดินเหนียวและซีลี้อยที่ 10 ต่อ 90 เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยสามารถกำจัดไอออนแคดเมียมได้ร้อยละ 83.95 เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) (ซึ่งผลการทดลองการดูดซับเหมาะสมกับ สมการการดูดซับแบบฟรุนดริช ) Freundlich equation (ดินเผาดูดซับสามารถดูดซับไอออน แคดเมียมที่พีเอช 3.28, 6, 7, 8 และ 9 ได้ 4.079, 2.909, 1.724, 3.257 และ 6.304 มิลลิกรัม/กรัมดิน เผาดูดซับ ตามลำดับ การศึกษาการชะละลายของดินเผาดูดซับหลังจากใช้งานแล้ว โดยการชะด้วย สารละลายกรดอ่อน pH 5 (และน้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อชะด้วยสารละลายกรดอ่อน pH 5 (มีแคดเมียมถูกชะออกมาสูงสุดเพียงร้อยละ 2.7 และไม่สามารถถูกชะออกมาได้เลยด้วยน้ำกลั่น การทดลองประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 8 ความเข้มข้นแคดเมียม 1 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยคอลัมน์ที่ระดับความลึกของดินเผาดูดซับ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร พบว่าที่ จุดหมดสภาพมีน้ำเสียไหลผ่านชั้นดินเผาดูดซับไปทั้งสิ้น 2395.9, 2985.7 และ 2408.2 เท่าของ ปริมาตรของคอลัมน์ ตามลำดับ

**ณัฐ ดิลกเกียรติ (2546)** การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตตัวดูดซับผลิต จากดินคำผสมกะลามะพร้าว และดินคำผสมกะลาปาล์ม และประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้ พบว่าตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด คือตัวดูดซับ ที่อัตราส่วน น้ำหนักระหว่างดินคำต่อกะลามะพร้าวที่ 20 ต่อ 80 ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินคำต่อ กะลามะพร้าวที่ 10 ต่อ 90 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยสามารถดูด

ชั้น เฮกซะวาเลนท์โครเมียมได้ร้อยละ 99.02 และ 96.66 ตามลำดับ ที่เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 3 จากการทดลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่ภาวะดังกล่าว ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด  $q_{max}$  (ของตัวดูดซับที่ผลิตจากคินคัมพสมกะลามะพร้าว และตัวดูดซับที่ผลิตจากคินคัมพสมกะลาปาล์มเท่ากับ 11.08 และ 8.20 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนท์โครเมียม/กรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การศึกษาการชะตัวดูดซับด้วยสารละลายกรดอ่อน และน้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมง พบว่าไม่สามารถชะไอออนโครเมียมออกมาได้ด้วยสารละลายกรดอ่อนและน้ำกลั่น การทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับผลิตจากคินคัมพสมกะลามะพร้าว ที่พีเอช 3 ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ระดับความลึกของตัวดูดซับ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร พบว่าปริมาณน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวดูดซับที่จุดหมดสภาพคือ 485.5, 521.7 และ 664.3 เท่าของปริมาตรของคอลัมน์ ตามลำดับ

**Fadil, Salim, และ Ahmad(1994)** ศึกษา MOPAS)Modified Oil Plam Shell ( ซึ่งเตรียมโดยล้างเปลือกปาล์มให้สะอาด นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดและคัดขนาดให้เท่ากับ 118 และ 236 มิลลิเมตร จากนั้น นำไปเผาที่อุณหภูมิ ,350 ,300 400 และ 420 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 - 2 ชั่วโมง จากนั้น นำมาล้างด้วยน้ำเย็นแล้วนำไปอบให้แห้งพบว่า ที่ขนาด 236 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิการเผาเท่ากับ 420 องศาเซลเซียส โดย MOPAS มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ถึง 97.5 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและสามารถดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและแคดเมียมต่ำๆและมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม

**Rengaraj, Arabindoo และ Murgesen (1998)** ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดขางพาราและเปลือกของเมล็ดปาล์ม โดยกระบวนการต่างๆดังนี้ คือ

กระบวนการใช้กรด กระบวนการกระตุ้นด้วยซัลเฟต กระบวนการกระตุ้นด้วยคาร์บอนเนต กระบวนการกระตุ้นด้วยคลอไรด์ กระบวนการโคโคไมต์และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันพบว่าเปลือกของยางพาราและเปลือกของเมล็ดปาล์มมีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยมีค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดยางพารา เปลือกเมล็ดปาล์มและถ่านที่มีจำหน่ายทั่วไปเท่ากับ 317, 348 และ 296 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

**Teker, İmamoğlu และ Saltabaş (1999)** ศึกษาการกำจัด ทองแดง (II) และ แคดเมียม (II) จากสารละลายโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกข้าว โดยแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ (1.100 กรัมซิงค์คลอไรด์ ต่อ น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) 24 ชั่วโมง กรองให้แห้งไปเผาในถ้วยกระเบื้อง ที่อุณหภูมิ 1023 เคลวิน เป็นเวลา 2 – 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปต้มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้จะมีค่าพื้นที่ผิว (BET. method) เท่ากับ 319 ตารางเมตรต่อกรัม โดยการดูดซับทองแดง (II) และ แคดเมียม (II) เพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นและที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำๆ มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ

**Gupta และ Sharma (2002)** ศึกษา Red Mud ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงาน Aluminum เป็นตัวดูดซับพบว่า Red Mud สามารถเป็นตัวดูดซับที่ดีและมีราคาถูก เนื่องจาก Red Mud มีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสี จากการทดลองแบบแบตช์และแบบคอลัมน์พบว่า มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีได้ดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำๆ โดยใช้ Red Mud ประมาณ 10 กรัมต่อลิตร ในช่วงพีเอชประมาณ 4 – 5 มีเวลาสัมผัสประมาณ 8 – 10 ชั่วโมง และการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



**Mathialagan และ Viraraghavan (2002)** ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เพอร์ไลต์ (Perlite) โดยทำการพิจารณาจากค่าพีเอชและเวลาในการสัมผัส ในการดูดซับพบว่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 6 และเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 6 ชั่วโมง โดยพบว่าอัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากการทดลองแบบเบดที่พบว่ามีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ 55 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าเพอร์ไลต์ (Perlite) มีความสามารถที่จะนำไปกำจัดแคดเมียมในสารละลายได้

**Cesur (2003)** ศึกษาการใช้เทคนิคการสกัดโดยไดไซโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) จะช่วยเพิ่มเข้มข้นของโลหะปริมาณน้อยได้ โดยเกิดเป็นคีเลต (Chelate) ของโลหะขึ้นมาก่อนที่จะเกิดการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ และไม่ทำให้เกิดการหลุดลอกออกจากถ่านกัมมันต์เมื่ออยู่ใน 20 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายกรดไนตริก สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำ อัลลอยด์ และอื่นๆ ได้

**Pereira และ Arruda (2003)** ศึกษาการดูดซับแคดเมียม โดย Vermicompost ซึ่งเป็น Humic Material พบว่าสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ดีและคาดว่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักตัวอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน เพราะ Vermicompost มีค่า CEC สูง จึงทำให้มีความสามารถในการที่จะรักษาโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนผิวได้ดี จากการศึกษา FT-IR พบว่าที่ผิวของ Vermicompost มีหมู่ฟังก์ชันจำพวก  $N - H, C = O, O - H$  เป็นต้น ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักไว้บนผิวได้ดี