



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids : HAAs)

##### 2.1.1 การเกิดกรดฮาโลอะซิติก

Disinfectant by - product (DBPs) เกิดมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของสารฆ่าเชื้อโรคที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มและน้ำประปา กับ Natural organic matter (NOM) ซึ่งโดยทั่วไปวัดในรูปของ total organic carbon (TOC) ใช้เป็นสารอินทรีย์ตั้งต้นซึ่งการเกิด DBPs นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำที่เข้าสู่ระบบ ทั้ง TOC, โบรมีน, ฟิเอช, อุณหภูมิ, แอมโมเนีย, carbonate alkalinity เป็นต้น รวมทั้งสภาวะในการเดินระบบ เช่น ปริมาณสารฆ่าเชื้อโรค เวลาสัมผัส การกำจัด NOM ออกก่อนที่จะถึงจุดที่ทำการฆ่าเชื้อโรค และการเติมสารฆ่าเชื้อโรคก่อน

คลอรีนในรูปของกรดไฮโปคลอรัส/ไฮออนไฮโปคลอไรท์ (HOCl/OCl<sup>-</sup>) ทำปฏิกิริยากับไฮออนโบรมีนถูกออกซิไดส์เป็น กรดไฮโปโบรมัส/ไฮโปโบรไมท์ไฮออน (HOBr/OBr<sup>-</sup>) กรดไฮโปคลอรัส (เป็นตัวออกซิไดส์อย่างรุนแรง) และ กรดไฮโปโบรมัส (สารที่มีความ halogenating agent สูง) ทำปฏิกิริยารวมกับ NOM จะเกิดเป็นคลอรีน DBPs ซึ่งประกอบด้วย ไตรฮาโลมีเทน (THMs) กรดฮาโลอะซิติก (HAAs) ฮาโลอะซิโตไนไทรล์ (HANs) ฮาโลคิโตน chloral hydrate และ chloropicrin



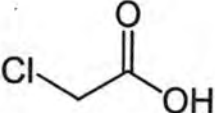
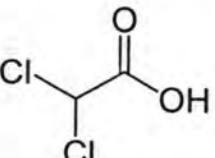
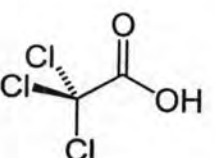
กรดฮาโลอะซิติก (HAAs) เกิดได้เมื่อมีการเติมคลอรีนภายใต้สภาวะที่มีฟิเอชเป็นกรดเล็กน้อยและมีความเข้มข้นของโบรมีนต่ำ ความเข้มข้นของ กรดไดคลอโรอะซิติก และ กรดไตรคลอโรอะซิติก ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม และความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติกทั้งหมดมีมากกว่า 50% ของความเข้มข้นไตรฮาโลมีเทน ในน้ำที่ได้สุดท้าย

##### 2.1.2 ชนิดของกรดฮาโลอะซิติก

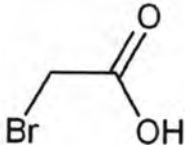
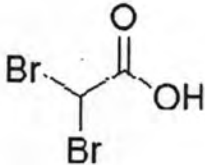
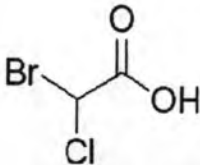
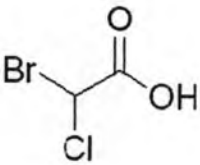
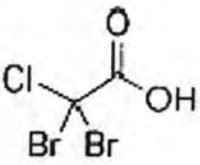
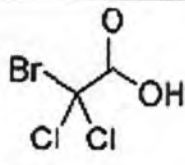
กรดฮาโลอะซิติกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของคลอรีน โบรมีน และ NOM ซึ่งกรดฮาโลอะซิติกนี้เป็นสารที่มีความหลากหลาย เช่น กรดโบรโมไดคลอโรอะซิติก (BDCA),

กรดไดโบรโมคลอโรอะซิติก และกรดไตรโบรโมอะซิติก (TBAA) จะเรียกรวมว่า HAA3 ส่วนกรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA) กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และกรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA) จะเรียกรวมว่า HAA5 และ HAA6 ก็คือ HAA5 รวมกับ กรดโบรโมคลอโรอะซิติก (BCAA) และถ้ารวม HAA6 และ HAA3 เข้าด้วยกันจะเรียกว่า HAA9 ซึ่งลักษณะของสารประกอบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบสำคัญที่มีอยู่ในน้ำและปริมาณของสารฆ่าเชื้อโรคที่มีพวงฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างและสมบัติพื้นฐานของกรดฮาโลอะซิติก

ชนิดของกรดฮาโลอะซิติก (HAAs)	โครงสร้าง	สมบัติพื้นฐาน
1. กรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA)		มวลโมเลกุล 94.5 g/mol ความหนาแน่น 1.58 g/cm <sup>3</sup> จุดเดือด 189 °c จุดหลอมเหลว 63 °c pKa 2.87 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้
2. กรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA)		มวลโมเลกุล 128.9 g/mol ความหนาแน่น 1.57 g/cm <sup>3</sup> จุดเดือด 194 °c จุดหลอมเหลว 13.5 °c pKa 1.26 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้
3. กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA)		มวลโมเลกุล 163.4 g/mol ความหนาแน่น 1.63 g/cm <sup>3</sup> จุดเดือด 196 °c จุดหลอมเหลว 57 °c pKa 0.51 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) โครงสร้างและสมบัติพื้นฐานของกรดฮาโลอะซีติก

ชนิดของกรดฮาโลอะซีติก (HAAs)	โครงสร้าง	สมบัติพื้นฐาน
4. กรดโมโนโบรโมอะซีติก (MBAA)		มวลโมเลกุล 138.95 g/mol ความหนาแน่น 1.934 g/cm <sup>3</sup> จุดเดือด 206-208 °c จุดหลอมเหลว 47-79 °c pKa 2.89 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้
5. กรดไดโบรโมอะซีติก (DBAA)		มวลโมเลกุล 217.85 g/mol ความหนาแน่น 1.943 g/cm <sup>3</sup> pKa 1.47 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้
6. กรดไตรโบรโมอะซีติก (TBAA)		มวลโมเลกุล 296.74 g/mol จุดเดือด 245 °c จุดหลอมเหลว 130-133 °c pKa 2.13
7. กรดโบรโมคลอโรอะซีติก (BCAA)		มวลโมเลกุล 173.36 g/mol pKa 1.39 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้
8. กรดไดโบรโมคลอโรอะซีติก (DBCA)		มวลโมเลกุล 252.26 g/mol pKa 1.09 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้
9. กรดโบรโมไดคลอโรอะซีติก (BDCA)		มวลโมเลกุล 207.81 g/mol pKa 1.09 ลักษณะการละลาย ละลายน้ำได้

### 2.1.3 ค่ามาตรฐานของกรดฮาโลอะซีติก

USEPA ได้ประกาศมาตรฐานน้ำดื่มเพื่อควบคุมปริมาณของสารปนเปื้อน เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค โดยที่มาตรฐานของ HAA5 มีระดับสูงสุดของสารที่ยอมให้มีในน้ำดื่ม Maximum contaminant level (MCL) เท่ากับ 60 µg/L (เฉลี่ยรายปี)

### 2.1.4 ความเป็นพิษของกรดฮาโลอะซีติก

กรดฮาโลอะซีติก (HAAs) ที่เกิดจากปฏิกิริยาคลอรีนชันของน้ำดื่ม ซึ่งประกอบด้วยสารที่อยู่ในรูปของคลอรีนและโบรมีน ปัจจุบันกรดฮาโลอะซีติกที่มีองค์ประกอบคลอรีนมีลักษณะทางพิษวิทยาละเอียดมากกว่าพวกโบรมีน โดยที่ความเข้มข้นของกรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) และกรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) มีความรุนแรงมากกว่าพวกกรดโมโนฮาโลอะซีติก

กรดฮาโลอะซีติก (HAAs) มีโอกาสที่จะสะสมบนผิวหนังและมีอันตรายต่อมนุษย์และระบบนิเวศน์ เนื่องจากมีความเป็นพิษและความคงตัวสูง ซึ่งมีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่า กรดฮาโลอะซีติกสามารถก่อให้เกิดเซลล์มะเร็งในมนุษย์ได้ (Kühn และ Pattard., 1990 อ้างถึงใน 1990Li, Cao และ Zhang, 2007)

กรดฮาโลอะซีติก (HAAs) มีความเป็นพิษหลากหลายในสัตว์ทดลอง ซึ่งส่วนใหญ่ HAAs มีผลเกี่ยวกับการก่อเซลล์มะเร็งซึ่งจะเกิดที่ตับเมื่อได้รับในปริมาณสูง ผลต่อการสืบพันธุ์ ผลต่อพัฒนาการของร่างกาย ผลต่อระบบประสาท และผลของเนื้องอกที่เกิดจาก DCAA และ TCAA โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการปรับเปลี่ยน และการแบ่งเซลล์ของสัตว์ทดลองร่วมด้วย

## 2.2 วิธีการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกในน้ำ

### 2.2.1 Photodegradation

การสลายด้วยแสงโดยใช้ Solar radiation เพื่อทำให้เกิดกระบวนการ photoreaction จากความยาวคลื่นต่าง ๆ ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงมีพลังงานเพียงพอจะทำให้ chemical bond แตกออกได้ วิธี Photodegradation เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อกำจัดกรดฮาโลอะซีติก (HAAs) ในน้ำดื่ม แต่อาจจะทำให้เกิดคลอโรฟอร์ม ซึ่งมีความเป็นพิษสูงกว่า HAAs ได้ (Spangenberg และคณะ, 1996; Wu และคณะ, 2001 อ้างถึงใน Li, และคณะ, 2007)

### 2.2.2 Electrochemical

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ค่อนข้างประสบความสำเร็จในการบำบัด ซึ่งไม่มีผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษเกิดขึ้นหรือมีการเติมสารเคมีที่เป็นพิษลงไป แต่อย่างไรก็ตาม การลดลงของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ของ HAAs จะเกิดขึ้นที่ potentials cathodic มากกว่า  $-1.0$  V ซึ่งก่อให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนมากเกินไป และการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าของน้ำมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงด้วย

### 2.2.3 Biodegradation

แบคทีเรียบางชนิดสามารถสลาย HAAs ได้ (McRae และคณะ, 2004 อ้างถึงใน Li และคณะ, 2007) แต่ biodegradation ด้วยจุลินทรีย์ เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับน้ำดื่ม เพราะมีการพิจารณาถึงมลภาวะใหม่ที่เป็นเหตุมาจากการเติมอาหารและจุลินทรีย์ที่ใช้บำบัด

### 2.2.4 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

การดูดซับกรดฮาโลอะซิติกด้วยถ่านกัมมันต์ มีข้อจำกัด คือ ประสิทธิภาพการบำบัดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติก เนื่องจากกรดฮาโลอะซิติกมีความชอบน้ำสูง และต้องมีความระมัดระวังในการควบคุมระบบที่ดี

นอกจากนี้ยังมีวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพ (biologically active carbon : BAC) เป็นการนำเอาถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ด (granular activated carbon : GAC) ทำให้เกิดขึ้นฟิล์มของจุลินทรีย์ที่พร้อมจะทำงานโดยอาศัยหลักการย่อยสลายดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ต้องใช้เวลาในการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้ได้เป็น BAC นาน และอาจเกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ขึ้นได้

## 2.3 กระบวนการดูดซับ (adsorption process) (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่ง ที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็ง ซึ่งก็คือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับนี้จะไม่รวมถึงกระบวนการการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้

ความเข้มข้นของสารลดลงไปนั้นเกิดจากกระบวนการดูดซับ กระบวนการโพลีเมอร์ไรซ์เซชัน หรือจากกระบวนการอื่นๆ แล้ว อาจเรียกกระบวนการนี้ว่า sorption process และปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของเหลว นั้น สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า Adsorbent ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า Adsorbate สำหรับแรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แรงด้วยกันคือ

### 1. แรงทางกายภาพ (Physical force) ประกอบด้วย

#### 1.1 แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

#### 1.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

### 2. แรงทางเคมี (chemical force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับ แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่มี

ของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้ (irreversible)

### 2.3.1 ลักษณะการดูดซับ

แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

#### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับโมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับในสารละลายด้วยแรง van der waals ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นโมเลกุลของสารจะยึดติดแน่นบนพื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เกิดการผันกลับ (reversible interaction) ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนออกจากตัวดูดซับนั้น และเรียกปรากฏการณ์ช่วงนี้ว่า Desorption

#### 2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorption)

เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ โดยการสร้างสารประกอบใหม่ระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับนั้น ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง และเนื่องจากการดูดซับเกิดเฉพาะบนพื้นที่ผิวบางแห่ง ทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด desorption ได้ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible) ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

### ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเลคตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าสำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (multimolecule layers) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่ 1 แล้วซึ่งบางครั้ง การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (activation energy) ด้วย

### 2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

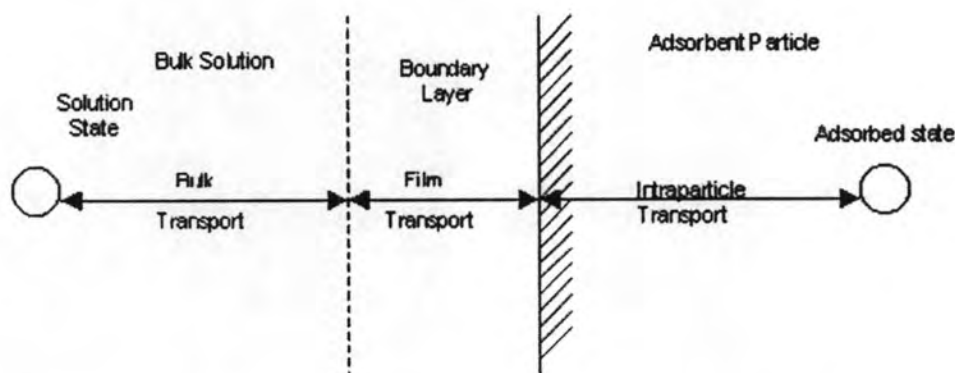
1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่ง



ขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับหรือการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไปยังตัวดูดซับ (adsorbent) นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับติดผิวชั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน
4. adsorption เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2542)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ไปกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์

#### 2.3.3.1 Langmuir Isotherm

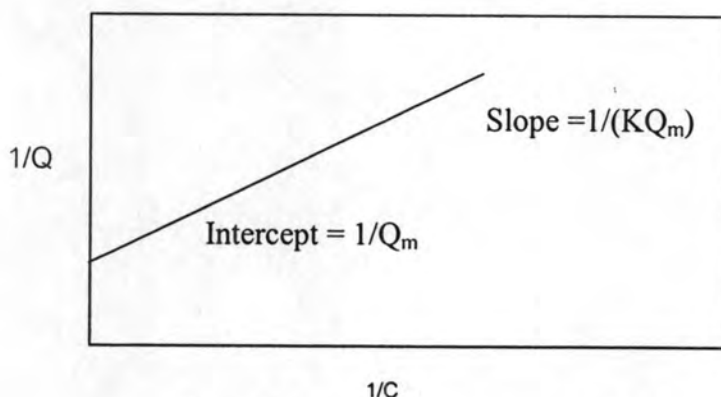
การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ ซึ่งมีการสมมติฐานว่าการดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับโมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีพลังงานของการดูดซับคงที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบพื้นผิวตัวดูดซับ

$$Q = \frac{Q_m KC}{1 + KC} \quad \dots(2.1)$$

- เมื่อ  $Q$  = จำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น  $C$  ( $\mu\text{g/g}$ )  
 $Q_m$  = จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวตัวดูดซับ ( $\mu\text{g/g}$ )  
 $C$  = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล ( $\mu\text{g/l}$ , ppb)  
 $K$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงาน

จัดเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{KQ_m} \frac{1}{C} \quad \dots(2.2)$$



ภาพที่ 2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

## 2.3.3.2 Freundlich Isotherm

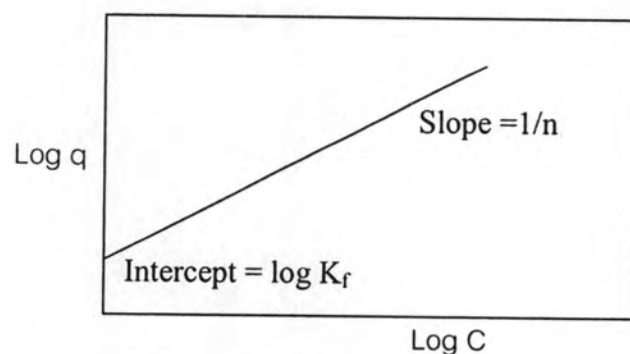
การดูดซับแบบฟรอนด์ลิชนี้ เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นด้วยพันธะอ่อนๆ

$$q_c = \frac{X}{M} = KC^{1/n} \quad \dots(2.3)$$

- เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ ( $\mu\text{g/g}$ )  
 $X$  = ปริมาณของสารที่ดูดซับ ( $\mu\text{g}$ )  
 $M$  = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ ( $\text{g}$ )  
 $C$  = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ ( $\mu\text{g/l}$ ,  $\text{ppb}$ )  
 $K$  = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ  
 $1/n$  = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย  
 (concentration dependence)

สมการฟรอนด์ลิช เมื่อเขียนกราฟค่า  $X/M$  และ  $C$  จากการทดลองลงบนกราฟ Log-Log จะได้ดังสมการ

$$\log\left(\frac{X}{M}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots(2.4)$$



ภาพที่ 2.3 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

สามารถหาค่า  $K$  และ  $1/n$  ได้โดยที่

$1/n$  = ความชันของกราฟ

$K$  = ค่า  $X/M$  ที่ค่า  $C = 1$

หากค่า  $K$  และ  $1/n$  มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า  $1/n$  มีค่ามาก แสดงว่า ความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงกันข้าม เมื่อความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1. ขนาด และพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรง กับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวกลางดูดซับ และพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางดูดซับ เมื่อตัวกลางดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางดูดซับ

#### 2. ลักษณะสมบัติของตัวถูกดูดซับ

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกดูดซับอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางดูดซับด้วย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 3. ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการขนส่งของโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวกลางดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวกลางดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวกลางดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 4. เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของตัวกลางดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

#### 5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และ ไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

### 2.4 Superparamagnetic nanoparticles

ความหมายของนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) ที่ถูกนิยามขึ้นโดยมูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Science Foundation, NSF) ของสหรัฐอเมริกาเมื่ออยู่ 3 มุมมองด้วยกันคือ

1. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอะตอม โมเลกุล หรือโมเลกุลมหภาค (macromolecule) ที่มีขนาดเล็กในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร
2. การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโครงสร้าง อุปกรณ์ หรือระบบต่างๆ ที่มีสมบัติและหน้าที่ใหม่ๆ เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความเล็กในระดับนาโน (nanoscale) ของสิ่งนั้นๆ
3. ความสามารถในการควบคุมและจัดการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในระดับอะตอม

ดังนั้นความหมายโดยรวมของนาโนเทคโนโลยี ก็คือ “การจัดการ การสร้าง การสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์และระบบต่างๆ ที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยความถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่างๆ มี “สมบัติที่พิเศษขึ้น” ทำให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้” (ณัฐพันธ์ ศุภกา, เว็บไซต์)

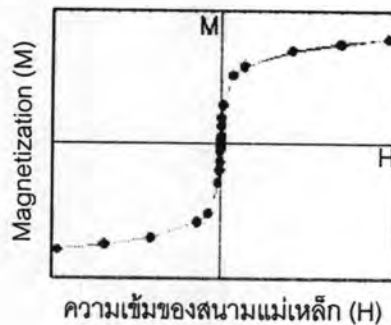
สมบัติทางแม่เหล็ก เป็นหนึ่งของสมบัติพิเศษที่เกิดขึ้นจากวัสดุระดับนาโน ซึ่งสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนี้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอะตอม และลักษณะการจับตัว ของอะตอมของธาตุ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ โดยที่สามารถแยก สสารและวัสดุ ออกเป็นกลุ่มต่างๆ ตามสมบัติทางแม่เหล็ก ได้ดังนี้

1. กลุ่มไดอะแมกเนติก (diamagnetic) วัสดุที่สามารถแสดงค่า สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ในเชิงลบเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

2. กลุ่มพาราแมกเนติก (paramagnetic) วัสดุที่สามารถ แสดงค่าสภาพรับไว้ได้ ทางแม่เหล็ก ในเชิงบวกเล็กน้อย เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

3. กลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) วัสดุที่สามารถ รักษาสภาพแม่เหล็ก ให้คงอยู่ได้ แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพแม่เหล็กไปได้ตามที่ต้องการ จึงทำให้วัสดุกลุ่มนี้มีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรม

เมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีขนาดเล็กลง จนถึงค่าวิกฤติค่าหนึ่ง ทำให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็กแบบใหม่ขึ้นมา นั่นคือ “ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic phenomenon)” โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic particles) จะมีสมบัติแม่เหล็ก ที่ไม่มั่นคงอันเนื่องมาจากการแปรปรวนของอุณหภูมิ โดยอนุภาคเหล่านี้จะไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่ได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเป็นแม่เหล็ก (Magnetization: M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก(H) ของอนุภาคที่มีซูเปอร์พาราแมกเนติก (ณัฐพันธุ์ ศุภกา, เว็บไซต์)

อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (Magnetic particles) มีการใช้มาตั้งแต่ช่วงกลางของ 1970 มักใช้ในทางด้านชีววิทยาและทางการแพทย์ คุณสมบัติแม่เหล็กเป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้เคลื่อนที่ได้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ อาทิเช่น การใช้นำส่งยา หรือสารออกฤทธิ์ ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็ก ภายนอกร่างกาย และการแยกทางชีวภาพ (bioseparations)

Iron nanoparticles technology เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีทางสิ่งแวดล้อมในระดับนาโนที่เกิดขึ้นเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ด้วยวิธีการที่หลากหลายเพื่อพัฒนาการผลิต Iron nanoparticles นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค และเพิ่มประสิทธิภาพการนำส่งและทำปฏิกิริยาด้วย ซึ่งการศึกษาในห้องปฏิบัติการนั้นแสดงให้เห็นว่า Iron

nanoparticles มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของมลพิษในสิ่งแวดล้อมทั่วไป เช่น Chlorinated organic solvents, organochlorine pesticides, PCBs, organic dyes, สารประกอบอนินทรีย์อื่น ๆ รวมถึงไอออนของโลหะ เช่น As(III), Pb(II), Cu(II), Ni(II) และ Cr(VI) เป็นต้น (Sun และคณะ., 2006)

#### 2.4.1 การสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก

วิธีการเตรียมหรือสังเคราะห์อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กมีอยู่หลายวิธี เช่น การออกซิไดซ์ของเฟอร์ริสซัลเฟตในสารละลายที่เป็นด่าง การทำปฏิกิริยา alkaline hydrolysis ของเฟอร์ริส และเฟอร์ริกคลอไรด์ และการตกตะกอนร่วมของสารละลายเฟอร์ริสและ เฟอร์ริกคลอไรด์ด้วยการไฮโดรไลซิสของยูเรีย เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน (Bruce และคณะ, 2004)

สำหรับการสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนร่วมของเหล็ก เป็นการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ร่วมกัน ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง จะทำให้เกิดเป็น  $Fe_3O_4$  โดยที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งใช้อัตราส่วนโมล  $Fe^{2+} : Fe^{3+}$  เท่ากับ 1 : 2 และต้องมีการควบคุมให้อยู่สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ ซึ่งจะได้อนุภาคนาโนที่มีการกระจายตัวที่ดี

#### 2.4.2 ความหลากหลายของพื้นผิว

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นาโนเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาขึ้นซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะผลิตหรือสร้างคุณสมบัติ และคุณสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ทาง biomedical และการวินิจฉัยโรคมมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความคิดว่าจะสร้างวัสดุที่มีโครงสร้างนาโน และมีความหลากหลาย ด้วยการปรับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพื้นผิว ซึ่งที่ผ่านมามีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคโดยการสร้างชั้นอะตอมของสารอินทรีย์ โพลิเมอร์ หรือ โลหะอนินทรีย์ (เช่น ทอง) พวงออกไซด์ (เช่น ซิลิกา หรือ อะลูมินา) ที่เหมาะสมกับ functionalization เพื่อติดต่อกับโมเลกุลต่าง ๆ (Berry และ Curtis, 2003 อ้างถึงใน Gupta A.K. และ Gupta M., 2005)

### 2.4.3 การประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ

การนำอนุภาคเหล็กออกไซด์ ขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้การวินิจฉัยโรคในหลอดแก้วที่มีการทดลองใช้เป็นเวลากว่า 40 ปีแล้ว ซึ่งในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเหล็กออกไซด์ชนิดต่าง ๆ กันมากขึ้น ทำให้มีการนำ magnetic particles ขนาดนาโนเข้ามาใช้ด้วย ส่วนใหญ่จะเป็น maghemite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) หรือ magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซึ่ง และมี biocompatibility ที่ดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ อาทิเช่น การใช้นำส่งยาหรือสารออกฤทธิ์ ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็ก ภายนอกร่างกาย และการแยกทางชีวภาพ (bioseparations) เช่น

1. การบำบัดรักษาเกี่ยวกับเซลล์ เช่น cell labeling, targeting และเป็นเครื่องมือในการวิจัยทางชีววิทยาของเซลล์เพื่อแยกและทำให้เซลล์บริสุทธิ์
2. การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ
3. การส่งถ่ายยา (drug delivery)
4. magnetic resonance imaging (MRI)
5. hyperthermia
6. magnetofection

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้นั้น อนุภาคจะต้องมีคุณสมบัติความอิ่มตัวแม่เหล็กสูง (magnetic saturation), biocompatibility และมีพื้นผิวที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ คุณสมบัติของพื้นผิวของ magnetic nanoparticles ที่เหมาะสมนั้นจะมีประสิทธิภาพทั้งการนำไปใช้ในร่างกาย (in vivo) และการทดลองในหลอดแก้ว (in vitro)

2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ (Punyapalakul, P. และ Takizawa, S., 2004)

#### 2.5.1 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว

การหาพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับไนโตรเจนโดยหาพื้นที่ผิวจำเพาะจาก สมการของ BET ซึ่งเป็นไอโซเทอรัมสำหรับก๊าซที่ดูดซับบนผิวของของแข็งแบบ Multi-molecule Layer พัฒนามาจากไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ โดยมีสมมติฐานดังนี้



1. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ
2. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
3. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
4. ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับชั้นต่อไป

ใช้หลักการดูดซับก๊าซในโตรเจนที่จุดเดือดปกติ อุณหภูมิประมาณ 77.5 เคลวิน โดยกรณีนี้ วัตถุประสงค์นำมาวัดจะมีพูนเล็ก คือ 10-100 อังสตรอม ซึ่งจะปล่อยให้ดูดซับก๊าซในโตรเจนที่ระดับความดันต่างๆต่ำกว่า 1 บรรยากาศ จนถึงสภาวะสมดุล แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซในโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันต่างๆ BET Isotherm มีรูปแบบสมการ คือ

$$\frac{P}{V(P-P_0)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{(c-1)P}{V_m c P_0} \quad \dots(2.5)$$

- โดย
- V = ปริมาตรของก๊าซในโตรเจนที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P
  - $V_m$  = ปริมาตรของก๊าซในโตรเจนในการคลุมพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบโมเลกุลชั้นเดียว (Mono-molecule Layer) ( $\text{cm}^3$  หรือ  $\text{m}^3$ )
  - P = ความดันที่สภาวะใดๆ (mmHg)
  - P = ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว  
(Vapor Pressure or Saturated Vapor) (mmHg)
  - c = ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

ถ้าทราบค่า  $V_m$  เราสามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง (ตัวดูดซับ) ได้ โดยอาศัยหลักการที่ว่าจากปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารตัวอย่าง สามารถนำไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับได้และโดยที่พื้นที่หน้าตัดของก๊าซหนึ่งโมเลกุลเป็นค่าที่ทราบ จึงคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างที่ทดสอบได้ เราอาจเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$S_{SP} = N_A \cdot a_{max} \cdot S_0 / W \quad \dots(2.6)$$

- โดยที่
- $S_{SP}$  = พื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่าง (หน่วย  $\text{cm}^2/\text{g}$  หรือ  $\text{m}^2/\text{g}$ )
  - $N_A$  = เลขอาโวกาโดรน์มเบอร์ ( $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )
  - $a_{max}$  = จำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล  
=  $V_m / 22414 \text{ cm}^3$

$$S_0 = \text{พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลก๊าซที่ถูกดูดซับ (หน่วย cm}^2, \text{m}^2)$$

$$W = \text{น้ำหนักของตัวอย่าง (ตัวดูดซับ) (หน่วยกรัม)}$$

#### การคำนวณหาค่าพื้นที่ผิว

เทคนิคที่ใช้ในการวัดพื้นที่ผิวของสารที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ วิธีการวัดหลายจุด (multipoint method) โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากเครื่อง คือ ปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับหรือคายออกจากผิวของสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนต่าง ๆ กัน จากสมการที่ (1) เราสามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$Y = a + bX \quad \dots(2.7)$$

$$\text{โดยที่} \quad Y = \frac{P}{V(P_0 - P)}, \quad a = \frac{1}{V_m C}$$

$$X = \frac{P}{P_0}, \quad b = \frac{C-1}{V_m C}$$

#### 2.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยใช้ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry)

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโคป ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาใช้วิเคราะห์อย่างแพร่หลาย เพื่อศึกษาสมบัติของพื้นผิวของตัวดูดซับที่จะส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับ

ในการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปในงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงสเปกตรัม 400 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 หมู่ฟังก์ชันที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ

หมู่ฟังก์ชัน	IR spectra bands (cm <sup>-1</sup> )	อ้างอิง
O-Si-O	470	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Si-O	1100	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Ring structure of SiO <sub>4</sub>	800	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ,
Si-OH	973	Roy และคณะ, 1996
H-O-H	3457	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978
Deformation mode of H <sub>2</sub> O	1650-1600	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978
O-H	3750	Parfitt และคณะ, 1985
CH <sub>3</sub> of ethoxy group	2970	Brunel และคณะ, 1995
-CH <sub>2</sub> - stretching vibration	2940	Brunel และคณะ, 1995
C-H of alkyl and phenyl groups	1500-1300	Wang และคณะ, 1999

### 2.5.3 การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว

หลักการของการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า จะต้องใช้ค่าจากจุดทุกจุดที่ได้จากกราฟของการไทเทรต โดยผลรวมของประจุลบเท่ากับผลรวมของประจุบวก (Schulthenes และ Sparks, 1986) ดังสมการ

$$\text{ผลรวมของประจุบวก} = \text{ผลรวมของประจุลบ}$$

สำหรับตัวอย่างในการไทเทรตพื้นผิวออกไซด์แอมโฟเทอริกด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ในรูปของสารละลายอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ ได้ผลดังนี้

$$[\text{OH}^-] + [\text{Cl}^-] + [\text{negative surface}] = [\text{H}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{positive surface}] \quad \dots(2.8)$$

หรือ

$$\sigma_0 = [\text{positive surface}] - [\text{negative surface}]$$

$$= [C_A - C_B] - [\text{H}^+ - \text{OH}^-] \quad \dots(2.9)$$

เมื่อ

$$\sigma_0 = \text{ประจุบนพื้นผิว}$$

$$[\text{positive surface}] = \text{ความเข้มข้นของประจุบวกบนพื้นผิว}$$

$$[\text{negative surface}] = \text{ความเข้มข้นของประจุลบบนพื้นผิว}$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$$

$$[\text{OH}^-] = 10^{\text{pH} - \text{pK}_w}$$

$$[\text{Cl}^-] = [\text{NaCl}]_{\text{add}} + [\text{HCl}]_{\text{add}}$$

$$[\text{Na}^+] = [\text{NaCl}]_{\text{add}} + [\text{NaOH}]_{\text{add}}$$

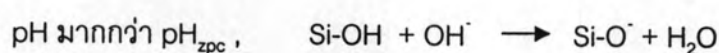
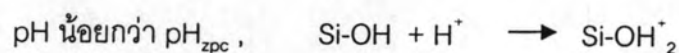
$$[C_A - C_B] = [\text{Cl}^-] - [\text{Na}^+]$$

$$= [\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}}$$

เมื่อประจุบนพื้นผิวเป็นกลาง ประจุลบและประจุบวกบนพื้นผิวจะมีค่าเท่ากัน หมายความว่า บนพื้นผิวมีประจุเป็นศูนย์ ที่พีเอชที่มีประจุเป็นศูนย์นี้ ( $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$[C_A - C_B] = [\text{H}^+ - \text{OH}^-] \quad \dots(2.10)$$

หมู่ไฮดรอกซิลจะแสดงบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นซิลิเกต ซึ่งโปรตอนสามารถเพิ่มหรือลดไปได้ ผลของประจุบนพื้นผิวจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ที่พีเอชต่ำ พื้นผิวจะมีการเพิ่มโปรตอน และจะกลายเป็นประจุบวก และที่พีเอชสูงโปรตอนจะหายไป ทำให้พื้นผิวเป็นประจุลบ



ค่า  $pH_{zpc}$  ของวัสดุที่เป็นซิลิเกต จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น Cabot L90, diatomite และ FSM-16 มีค่า  $pH_{zpc}$  เท่ากับ 2 - 3.7, 4 - 7 และ ประมาณ 6 ตามลำดับ (Al-Ghouti และคณะ, 2003; Mohamed และคณะ, 2003; Noh และคณะ, 1988)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu และคณะ (2004) ศึกษาการเตรียม magnetite nanoparticles โดยการตกตะกอนร่วมระหว่าง  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ด้วย  $NH_4OH$  จากนั้นเคลือบผิวด้วยซิลิกา จะได้ magnetic silica nanospheres ที่มีการกระจายตัวดี ขนาดของอนุภาคถูกควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง  $SiO_2 : Fe_3O_4$  และมีการติดด้วยหมู่อะมิโนที่ผิวของอนุภาคและกระตุ้นโดย glutaraldehyde ซึ่งอนุภาคที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 100-200 nm. และมีลักษณะเป็น superparamagnetic. ผลจาก XRD ทำให้เห็นถึงโครงสร้างของกลุ่มสารประกอบออกไซด์ของ magnetite particle ที่เคลือบด้วยซิลิกา และพารามิเตอร์ที่สำคัญของ magnetic ได้แก่ ขนาด size distribution โครงสร้าง ความชอบน้ำไม่ชอบน้ำ ความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาที่ผิว คุณสมบัติ superparamagnetic และรายงานการวิเคราะห์การยับยั้งด้วยการตรึงโปรตีนพิสูจน์ให้เห็นว่า อนุภาคที่มีการติดด้วยหมู่อะมิโน มีความสำคัญต่อความสามารถที่ยับยั้งโปรตีน

Liu, Xing และคณะ (2004) ศึกษาการสังเคราะห์ amino-silane modified magnetic silica ด้วยวิธีที่ใหม่และง่ายก็คือ การเตรียม magnetite nanoparticle ( $Fe_3O_4$ ) จากการตกตะกอนร่วมของเกลือเฟอร์ริสและเฟอร์ริกด้วย  $NH_4OH$  และทำการเคลือบผิวด้วยซิลิกาในสารละลายไฮเดียมซิลิเกต (โดย acidifying technology) ซึ่งจะได้อนุภาคนาโนที่มีการกระจายตัวที่ดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 50-80 nm. และมีคุณสมบัติเป็น superparamagnetic ซึ่งมีข้อดี คือ mechanical rigidity สูง, ไม่มีการรวมตัว (aggregation) และ biocompatibility งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการยับยั้ง bovine serum albumin (BSA) ซึ่งพีเอช ionic strength และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ BSA มีผลต่อการตรึง BSA บนอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ และอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีความจุ BSA สูงสุด 86 mg/g ที่ 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 5.0

Campo และคณะ (2005) ศึกษาการสังเคราะห์ Amino - functionalized magnetite และ silica magnetite nanoparticles ได้โดยใช้ APTS (aminopropyltriethoxysilane) เป็นสารปรับปรุงพื้นผิว โดยมีการแปรผันสภาพในการทดลองต่าง ๆ นั่นคือ เวลาในการทำปฏิกิริยาและ

อุณหภูมิ ทำให้มีลักษณะและความหนาแน่นของหมู่อะมิโนที่ผิวแตกต่างกัน ซึ่งอนุภาคที่ได้นี้ สามารถใช้ในการ immobilization ของ oligonucleotides ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของหมู่อะมิโนที่ผิว ทำให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยา silanization ที่ผิวให้สูงสุดมีความจำเป็น และต้องมีการวางแผนศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงในการสังเคราะห์ให้ได้อนุภาคที่มีคุณสมบัติสูงขึ้นด้วย.

Gupta A.K. และ Gupta M. (2004) ศึกษา Superparamagnetic iron oxide nanoparticles ที่มีพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับใช้ในทางการแพทย์ เช่น MRI, การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ, วิธีการตรวจสอบสารโดยใช้แอนติบอดี, การล้างพิษออกจากของเหลวทางชีวภาพ, hyperthermia, drug delivery และการแยกเซลล์ เป็นต้น ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้คือ การตกตะกอนร่วมของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกคลอไรด์ ด้วยสัดส่วนโมล 1: 2

Chin และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนในน้ำเสียที่ถูกกักตร้อนออกมาจากแผงวงจรของอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ (CMP wastewater) โดยใช้ magnetite nanoparticles เป็นตัวกลางในการรวมตัว (aggregation) ของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้น พบว่า ความขุ่นของน้ำเสีย CMP ลดลงจาก 110 NTU เหลือ 7 NTU เมื่อพีเอชของสารละลายเท่ากับ 6 และไม่มีการเติมเกลือ เนื่องจากซิลิกาและ magnetite nanoparticles มีประจุตรงข้ามกันและเกิดการรวมตัว (aggregation) กันระหว่างซิลิกากับ magnetite nanoparticles ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต และเมื่อมีการดึงดูดด้วยแรงสนามแม่เหล็กที่สูงกว่า 800 เกาส์ ทำให้ความขุ่นของน้ำเสียเหลือเพียง 1 NTU เท่านั้น

Li และ คณะ (2007) ศึกษาการกำจัดฮาโลเจนด้วยการดีฮาโลจีเนชัน (dehalogenation) ของกรดฮาโลอะซิติก (HAAs) โดยใช้ฮีโมโกลบินที่ถูกตรึงบนขั้วไฟฟ้า carbon nanotube (CNT) เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งสามารถกำจัดฮาโลเจนออกจากกรดคลอโรอะซิติกและกรดโบรโมอะซิติกได้อย่างสมบูรณ์ด้วยการกระตุ้นฮีโมโกลบินอย่างเป็นขั้นตอน ด้วยกระบวนการดีฮาโลจีเนชันที่  $-0.400\text{ V}$  (ด้วย saturated calomel electrode (SCE)) และ  $-0.200\text{ V}$  ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัด  $10.5\text{ mM}$  กรดไตรคลอโรอะซิติกและกรดไดคลอโรอะซิติกเท่ากับ 97% และ 63% ตามลำดับ โดยให้กระแสไฟฟ้า  $-0.400\text{ V}$  (vs.SCE) เป็นเวลา 30 นาที กับ Hb-loaded packed-bed flow reactor ส่วนกรดไตรโบรโมอะซิติกและไดโบรโมอะซิติกสามารถกำจัดได้ 100%

Babi และ คณะ (2007) ศึกษาการกำจัดกรดฮาโลอะซิติก ไตรฮาโลมีเทน และคาร์บอนที่ละลายได้โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากน้ำดื่มในเมืองเอเธนส์ประเทศกรีซ เวลาในการวิจัยนาน 638 วัน พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดดูดซับคาร์บอนที่ละลายได้มากที่สุด การกำจัดไตรฮาโลมีเทน และกรดฮาโลอะซิติกและคาร์บอนที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่ จะเกิดจากการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ในขณะที่การกำจัดกรดฮาโลอะซิติกและคาร์บอนที่ละลายน้ำได้บางส่วนจะเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพในขั้นการดูดซับ การกำจัดคลอรีนมีสาเหตุมาจากการเร่งในชั้นพื้นผิวของคาร์บอนและการเติบโตของจุลินทรีย์ก็มีส่วนช่วยเช่นกัน นอกจากนี้ ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดถึงที่สอง ยังมีประสิทธิภาพมากกว่าครั้งแรก เนื่องจากขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เล็กกว่าและมีอัตราน้ำเข้าที่ต่ำกว่า

Ratasuk และ คณะ (2008) กำจัดกรดฮาโลอะซิติกด้วยโอโซน และถ่านกัมมันต์ชีวภาพ โดยให้ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติกเริ่มต้นเท่ากับ 60, 90 และ 120 ppb ติดตั้งถึงปฏิกรณ์ของระบบโอโซน และใช้คอลัมน์ในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร วิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซิติกหลังการบำบัดด้วยวิธีของ US EPA Method 552.2 พบว่า กระบวนการบำบัดด้วยโอโซน สามารถกำจัดกรดฮาโลอะซิติกได้เพียง 20% เท่านั้น แต่เมื่อผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ชีวภาพ จึงจะสามารถกำจัดกรดฮาโลอะซิติกไปได้มากกว่า 90% โดยการบำบัดด้วยโอโซนมีสมบัติในการคัดเลือก กรดโมโนคลอโรอะซิติก และ โมโนโบรโมอะซิติกเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถกำจัดกรดไตรคลอโรอะซิติกได้ อาจเพราะจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจน และความเกะกะของโครงสร้างของกรดไตรคลอโรอะซิติก แต่สำหรับการกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพสามารถกำจัดกรดฮาโลอะซิติกได้ทุกชนิดไม่มีสมบัติการคัดเลือก

Ratasuk และ คณะ (2009) ศึกษาการกำจัดกรดฮาโลอะซิติกด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน 3 ชนิด โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮาโลอะซิติกที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 60 ไมโครกรัม/ลิตร และวิเคราะห์หาปริมาณของกรดฮาโลอะซิติกหลังจากการบำบัดด้วยวิธีของ US EPA Method 552.2 พบว่า เมมเบรนที่มีสภาพประจุเป็นลบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดกรดฮาโลอะซิติกสูงสุดได้ถึง 90-100 % เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าที่ผลักรีดฮาโลอะซิติกที่มีไอออนเป็นลบให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ อีกทั้งยังพบว่ากรดไตรคลอโรอะซิติกถูกกำจัดได้น้อยที่สุด อาจเพราะกรดไตรคลอโรอะซิติกมีค่า pKa ต่ำ ทำให้แตกตัวได้มาก สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่ากรดไตรคลอโรอะซิติกจึงผ่านเมมเบรนไปได้ ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดกรดไตรคลอโรอะซิติกจึงต่ำที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติกที่เข้าสู่ระบบ จะทำให้เกิดผลตรงข้าม เนื่องจากจะเกิดการสะสมของกรดฮาโลอะซิติกที่ผิวของเมมเบรน

Punyapalukul และ Takizawa (2004) ศึกษาการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) โดยใช้เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต (HMSs) เป็นตัวกลางดูดซับ 5 ชนิด ซึ่งมีการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน 3 ชนิด และชนิดที่มีการแทนที่ด้วยไททาเนียม พบว่า ตัวกลางดูดซับที่มีการต่อติดด้วยหมู่อะมิโนมีความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) ที่ความเข้มข้นสูง เนื่องจากหมู่อะมิโนที่ผิวของตัวกลางดูดซับมีประจุบวกสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) รวมถึงตัวกลางดูดซับที่มีการต่อติดหมู่อะมิโนร่วมกับหมู่เมอร์แคปโต เช่นกัน ส่วนการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) ที่ความเข้มข้นต่ำนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

Suwat (2006) ศึกษาการกำจัดกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) ช่วงความเข้มข้นต่ำด้วยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ทำการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตและศึกษาจลนพลศาสตร์และความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก พบว่า ปัจจัยทางกายภาพไม่มีผลความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่สมบัติความชอบน้ำและแรงทางไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่า มีโซพอร์สซิลิเกตที่ไม่ได้ต่อติดหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่ามีโซพอร์สซิลิเกตชนิดอื่น ๆ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ส่วนการต่อติดหมู่เมอร์แคปโตไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $pH_{Zpc}$  จึงบอกได้ว่าแรงทางไฟฟ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับ และอุณหภูมิในการทดลองไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกด้วย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นอาจจะสามารถกล่าวได้ว่าวิธีการสังเคราะห์ magnetite nanoparticles ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) ของเฟอร์ริสและเฟอร์ริกในสภาวะที่เป็นต่าง ทำให้ได้อนุภาคขนาดนาโนที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่มีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบด้วยซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่อะมิโน จะเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการตรึงหรือยับยั้งสารไว้ที่ผิวของอนุภาคได้ และอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้นสามารถแยกออกจากสารละลายได้ด้วยแรงแม่เหล็ก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคอื่นๆ ในน้ำได้ด้วยแรงดูดทางไฟฟ้าสถิตอีกด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วการนำอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมาประยุกต์ใช้ มักจะใช้กันในการการแพทย์ เช่น การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ หรือการส่งถ่ายยา เป็นต้น ในทางสิ่งแวดล้อมยังไม่ค่อยใช้กันมากนัก

สำหรับการกำจัดกรดฮาโลอะซิติกด้วยการดูดซับนั้น ได้มีการพัฒนาพื้นผิวของตัวกลางดูดซับให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น ด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลาง



ดูดซับ ได้แก่ หมูอะมิโน ซึ่งเป็นการเพิ่มความชอบน้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายทำให้หมูฟังก์ชันบนพื้นผิวเปลี่ยนไปส่งผลต่อความเป็นประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ซึ่งแรงที่อาจจะเกิดขึ้น คือ แรงทางประจุไฟฟ้าซึ่งจะดึงดูดระหว่างพื้นผิวที่มีประจุเป็นบวกและกรดฮาโลอะซิติกที่มีประจุเป็นลบได้ดี อีกทั้งโครงสร้างโมเลกุลของกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย