

## การตรวจเอกสาร

### สารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา

สารอินทรีย์ละลายน้ำในระบบการผลิตน้ำประปามาจากน้ำดิบที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปาโดยส่วนใหญ่แล้วคือ สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) NOM ที่มีในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปจะเกิดจากการเจริญเติบโต หรือการเน่าเปื่อยของพืชและกระบวนการสลายตัวของจุลินทรีย์ต่างๆ โดยแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำมีผลต่อส่วนประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่พบ

NOM ในน้ำพบอยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ หรือในรูปสารละลายโดยทั่วไปอนุภาคสารอินทรีย์จะถูกกำจัดได้ง่ายโดยกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน เหมือนกับอนุภาคทั่วไปที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ NOM ละลายน้ำคือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนที่ขนาด 0.45 ไมโครเมตรซึ่งไม่สามารถกำจัดโดยวิธีการเดียวกันกับสารอินทรีย์โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วน NOM ที่เป็นคอลลอยด์ จะแตกต่างจากโมเลกุลของ NOM ละลายน้ำตรงที่สามารถกำจัดออกโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันแบบทำให้ประจุเป็นกลาง (Charge Neutralization) (Crozes et al., 1995)

NOM สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นฮิวมิก และส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก NOM ที่เป็นฮิวมิกจะมีสมบัติเป็นสาร Hydrophobic โดยประกอบด้วย กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน ส่วน NOM ที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีสมบัติเป็นสาร Hydrophobic น้อยกว่าส่วนที่เป็นสารฮิวมิก โดยประกอบด้วย Hydrophilic Acids โปรตีน กรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต (Owen et al., 1995) โดยทั่วไป NOM ที่เป็นสารฮิวมิกจะมีประมาณร้อยละ 45-65 (Hanra et al., 1995) และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีประมาณร้อยละ 35-55

### ลักษณะสมบัติของสารฮิวมิก

สารฮิวมิกมีสูตรโมเลกุล และสูตรโครงสร้างไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า กรดฮิวมิกเป็นสารโพลีเมอร์ ที่ประกอบด้วย อะโรมาติกโมโนเมอร์ (Aromatic Monomer) ในปริมาณต่างๆกัน (Chirstman และ Ghassemi, 1996) โครงสร้างของกรดฮิวมิก

ประกอบด้วย กลุ่มทำปฏิกิริยา (Functional Groups) หลายกลุ่ม เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และคีโตน (Ketone) โดยพบว่ากลุ่มทำปฏิกิริยาที่เป็นคาร์บอกซิลิกมีปริมาณถึง 60-90% ของกลุ่มทำปฏิกิริยาทั้งหมด ดังนั้นสารฮิวมิกจึงมีประจุลบในช่วงค่า พีเอช ของน้ำธรรมชาติและค่าพีเอชที่สูงกว่านั้น และเนื่องมาจากกลุ่มทำปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้สารฮิวมิกสามารถละลายน้ำได้ดีที่ พีเอชสูงๆ และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนและการเกิดสารประกอบกับไอออนประจุบวกที่มีสองและสามวาเลนซ์ โดยไอออนประจุบวกที่มีสองวาเลนซ์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญขององค์ประกอบของสารอนินทรีย์ในน้ำธรรมชาติสามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิลิกในสารฮิวมิกทำให้ประจุของสารฮิวมิกมีค่าลดน้อยลง ( Hanra et al., 1995)

Stevenson (1982) ได้อธิบายถึงลักษณะโครงสร้างของกรดฮิวมิกว่าเป็นวงของโมเลกุลสายยาวหลายๆ โมเลกุล ซึ่งเชื่อมจากส่วนหนึ่งของวงไปยังวงอื่นๆ การเชื่อมของวงนี้อาจเนื่องมาจากพันธะ ระหว่างส่วนที่เป็น Hydrophobic ของโมเลกุล เช่น ไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่เป็น Hydrophobic อื่นๆ กับส่วนที่เป็น Hydrophilic (กลุ่มทำปฏิกิริยาที่มีขั้ว) โดยเกิดขึ้นในสารละลายในดิน หรือเกิดขึ้นโดยตรงกับผิวของแร่ธาตุในดิน

### น้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิก

น้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิก มีค่าอยู่ในช่วงกว้างมาก Gjessing (1996) รายงานผลจากการทดลองโดยใช้ Gel Filtration ถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกว่ามีค่าระหว่างน้อยกว่า 700 ถึงมากกว่า 20,000 ซึ่งค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ได้ยังขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย ส่วนกรดฟัลวิกพบว่าส่วนใหญ่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 200 – 1,000 (Gassemi Cristman, 1968) เช่นเดียวกับ Schnitzer and Khan (1972) ได้สรุปค่าน้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิกที่หาโดยวิธีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ในช่วงปี 1990s การหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกสามารถทำได้แน่นอนขึ้น Hassett and Banwart (1992) ได้สรุปค่าน้ำหนักโมเลกุล ของกรดฮิวมิก ว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20,000 – 1,360,000 และ น้ำหนักโมเลกุลของกรดฟัลวิก อยู่ในช่วง 275 – 2110

### ตารางที่ 1 น้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิก

ช่วงค่าของน้ำหนักโมเลกุล	วิธีการประเมิน
5,000-7,000	Dialysis
4,500-26,000	Diffusion
14,000-20,000	Gel filtration
5,000-100,000 (Average 25,000)	Gel filtration
10,000-200,000	
~ 25,000	Sedimentation , Viscosity
~ 36,000	Viscosity
47,000-53,800	Osmometry
~ 53,000	Sedimentation

ที่มา : Schnitzer and Khan (1972)

### สาเหตุที่ต้องกำจัด NOM ออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา

ปัญหาของการมี NOM อยู่ในแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาเป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่มาก่อน ค.ศ. 1970 โดยงานวิจัยจะเน้นในเรื่องลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำดื่ม และวิธีการกำจัด NOM ออกจากแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา สาเหตุที่ NOM เป็นปัญหา และมีความต้องการที่กำจัดออก ทั้งนี้เนื่องจาก NOM เป็นสาเหตุในการเกิดสีในแหล่งน้ำ ต่อมาจึงพบปัญหาอื่นๆ ที่เกิดจากการมี NOM อยู่ในแหล่งน้ำ เช่น การทำให้ความต้องการปริมาณสารฆ่าเชื้อโรคมากขึ้นในการผลิตน้ำประปา ความสามารถในการจับโลหะ และสารอินทรีย์เกลียดน้ำ (Hydrophobic Organic Chemicals) ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเหล่านี้ในน้ำที่ผลิตได้ การก่อให้เกิดการก่อก้อน และการเจริญเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้สารออกซิแดนท์ เช่น คลอรีน หรือ โอโซน ในกระบวนการบำบัดการก่อให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ แนวโน้มในการเป็นตัวขัดขวางการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆ ในน้ำ และการเป็นสารที่ก่อให้เกิดสาร Disinfection By-products (DBPs) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมากในปัจจุบัน

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาทั่วไปในปัจจุบัน หรือที่เรียกว่า Conventional Process ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน การตกตะกอน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนั้น ไม่สามารถกำจัด NOM ได้เพียงพอที่จะควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ ในทางกลับกันอาจยังเพิ่มปัญหาให้กับน้ำประปาที่ผลิตได้ ตัวอย่างเช่น ในขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนให้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะทำให้มีปริมาณ NOM อยู่มาก หากการฆ่าเชื้อโรคคำนึงถึงเพียงแต่ปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำประปา (Free Residual Chlorine) อาจก่อให้เกิดสาร DBPs เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane , THMs) ในปริมาณสูงซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่มีอันตรายมาก โดยปริมาณของ NOM ในแหล่งน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เป็นเพราะว่าการเติบโตของเมืองและการใช้น้ำในภาคการเกษตรมีแนวโน้มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาการกำจัด NOM ออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา

#### พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการวัดปริมาณของ NOM

ค่า TOC และค่า UV<sub>254</sub> เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนที่ดีในการวัดปริมาณของ NOM การวัดค่า TOC เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอนซึ่งประกอบด้วย สารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon , DOC) ที่เป็น TOC ส่วนที่ผ่านสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45  $\mu\text{m}$  อนุภาคสารอินทรีย์คาร์บอน (Particulate Organic Carbon , POC) คือสารอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ และถูกกักโดยสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45  $\mu\text{m}$  สารคาร์บอนอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Carbon , VOC) คือสารอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวได้และถูกกำจัดออกโดย Gas Stripping ภายใต้สภาวะจำเพาะ และสารคาร์บอนอินทรีย์คงตัว (Nonpurgeable Organic Carbon , NPOC) คือ ส่วนของ TOC ที่ไม่ถูกกำจัดออกโดยวิธี Gas Stripping

การวัดค่า UV<sub>254</sub> อาศัยหลักการที่ว่าสารอินทรีย์เป็นสารอะโรมาติกหรือเป็นสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่ จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 254 nm จึงทำให้การวัดค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมในการวัดปริมาณของสารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น สารฮิวมิก เพราะประกอบไปด้วยสารอะโรมาติก และมีปริมาณมากในน้ำธรรมชาติ Edzwald และคณะ (1985) พบว่า UV<sub>254</sub> เป็นตัวแทนที่ดีมากในการวัดปริมาณ Nonpurgeable TOC (NPOTOC) และสารที่ทำให้เกิด ไตรฮาโล

มีเทน (Trihalomethane Precursors , THMP) โดยอัตราส่วนระหว่างค่า  $UV_{254}$  กับค่า TOC ยังสามารถใช้ในการบอกลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำได้โดยบอกถึงระดับของความไม่อิ่มตัวของ NOM นอกจากนั้น Eaton (1995) ได้สรุปผลจากการใช้ค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารอินทรีย์ในน้ำเพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน ที THMP และสารที่ทำให้เกิดสาร DBPs ชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังใช้ค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตในการตรวจสอบน้ำเสียของระบบการกำจัดน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม และประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยการดูดซับด้วยคาร์บอนแบบเกร็ด กระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการบำบัดน้ำแบบอื่นๆ

### กระบวนการที่ใช้ในการกำจัด NOM

#### 1. การกำจัด NOM โดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ โคแอกกูเลชัน

มีการศึกษาถึงการกำจัด NOM โดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ โคแอกกูเลชัน จากการสำรวจโดยหน่วยงานของประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้ชื่อ The National Organic Reconnaissance Survey (NORS) ระบุว่า การกำจัดสาร NPTOC โดยใช้กระบวนการ Conventional Process มีเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยการใส่สารส้มตามด้วยการกรองด้วยทราย สามารถกำจัดสาร THMP ได้ประมาณ 2 ใน 3 (Symons et al., 1975; Oliver and Lawrence, 1979) และ Kavanaugh (1978) ได้ศึกษาการใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ในการกำจัด สาร THMP และสรุปว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด สาร THMP มีดังนี้คือ

- ปัจจัยทางกายภาพ ประกอบด้วย การผสมขั้นแรกของสาร โคแอกกูแลนต์ สภาวะการกวนในถังกวนช้าและกระบวนการแยกระหว่างของแข็งกับของเหลว

- ผลของปัจจัยทางเคมีพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5 – 6 สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้ม ในขณะที่สาร โคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดย  $Fe^{+3}$  มีค่าในช่วง 3-5 และพบว่า 15 เปอร์เซ็นต์ของกรดฮิวมิกไม่ถูกกำจัดโดยใช้สารส้ม

- ผลของประเภทของสารฮิวมิก พบว่ากรดฟัลวิกต้องการปริมาณสารส้มสูงกว่ากรดฮิวมิกเพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การกำจัด80เปอร์เซ็นต์เท่ากัน

- ความต้องการ โพลีเมอร์ พบว่าการเกิดขึ้นของฟล็อก ในสถานะที่ไม่มีความขุ่นทำให้คุณสมบัติในการตกตะกอนไม่ดี

Crozes *et al.*, (1995) สรุปผลการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในการกำจัด NOM ว่าสาร โคแอกกูแลนต์ที่เป็นธาตุเหล็ก เช่น  $FeCl_3$  มีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม โดยค่าพีเอช ในกระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัด NOM เมื่อใช้  $FeCl_3$  เป็นสารโคแอกกูแลนต์เบื้องต้น โดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.8-6.2 จะสามารถกำจัด NOM ได้ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ลงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันอาจจะไม่เพียงพอในการกำจัด NOM เพื่อควบคุมปริมาณสาร DBPs (Jacangelo *et al.*, 1995)

## 2. การกำจัด NOM โดยกระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกร็ด

Mc Creary and Snoeyink (1979) ได้ศึกษาผลของเกลืออนินทรีย์ และ พีเอชต่อการดูดติดผิวของ NOM พบว่า การเพิ่มการดูดติดผิวของกรดฟัลวิกที่พีเอชต่ำ เป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ NOM มีความเป็นกรดอ่อนๆ โดยการลดลงของพีเอชทำให้ความสามารถในการละลายได้ลดลง และถูกดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกร็ดได้ดีขึ้น แหล่งที่มาของ NOM ก็เป็นปัจจัยสำคัญ ดังจะเห็นได้ว่า กรดฟัลวิก ที่เกิดจากการสลายตัวของพืช ดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกร็ดได้ดีกว่ากรดฮิวมิก ที่มีขายในท้องตลาด และกรดฮิวมิกที่มาจากดิน การใช้กระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกร็ดในการกำจัด NOM อย่างมีประสิทธิภาพต้องมีการศึกษา ในสถานะเฉพาะของ NOM และคาร์บอนแบบแกร็ดในแต่ละแห่ง โดยการบำบัดเบื้องต้น หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของ NOM จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้กระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกร็ด ในการกำจัด NOM ได้ (Jacangelo *et al.*, 1995)

### 3. การกำจัด NOM โดยกระบวนการเติมโอโซน

Trussell and Umphres (1978) รายงานว่ามี 5 ปัจจัยที่อาจมีผลต่อความไม่แน่นอนในการกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs สำหรับการทดลองที่แตกต่างกัน คือความเข้มข้นและคุณสมบัติจำเพาะของสารอินทรีย์ คุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ในน้ำ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซน ความแตกต่างของเวลาสัมผัสหลังจากการเติมคลอรีน ความล่าช้าระหว่างเวลาในการเติมโอโซนกับเวลาในการเติมคลอรีน

ได้มีการทดลองใช้กระบวนการเติมโอโซน เพื่อลด NOM สำหรับโรงงานผลิตน้ำประปาบางแห่งในระดับ Pilot-scale สรุปผลจากการทดลองดังกล่าวโดยพิจารณาถึงการลดสารทั้งหมดเมื่อใช้เวลาสัมผัสของสารคลอรีนประมาณ 24 ชม.อย่างไรก็ตามการเติมโอโซนก็สามารถเกิด DBPs ได้เช่นกัน โดย Najm and Krasner (1995) ทำการศึกษาผลของ  $\text{Br}^-$  และ NOM ต่อการเกิดของ Ozonation By-products ในแหล่งน้ำที่มี  $\text{Br}^-$  ในปริมาณสูงจะทำให้เกิด โบรเมต (Bromate) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในปริมาณสูงด้วยภายหลังจากการเติมโอโซน และถ้ามีค่า TOC สูงก็จะเพิ่มปริมาณความต้องการโอโซน ซึ่งจะทำให้เพิ่มปริมาณการผลิตโบรเมตด้วยเช่นกัน

Jacangelo (1995) ได้สรุปผลจากการทดลองโดยใช้กระบวนการในการกำจัด NOM ออกจากน้ำ 3 กระบวนการ คือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน การดูดซับด้วยคาร์บอนแบบเกร็ด และกระบวนการ Nanofiltration Membrane (NF) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัด NOM ของแต่ละกระบวนการ โดยพบว่า กระบวนการ NF มีประสิทธิภาพการกำจัด NOM ดีที่สุด แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการยังค่อนข้างสูงกว่ากระบวนการอื่น ส่วนกระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพการกำจัด NOM ปานกลางแต่ค่าใช้จ่ายการดำเนินระบบค่อนข้างต่ำ

ในการกำจัด NOM โดยวิธีต่างๆย่อมมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป โดย Marsono (1996) ได้สรุปข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 2** ประสิทธิภาพการกำจัด NOM จากงานวิจัย 3 กระบวนการ

กระบวนการ	ประสิทธิภาพ การกำจัด NOM	ความซับซ้อน ของกระบวนการ	ค่าใช้จ่าย ของกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน	พอใช้-ดี	ต่ำ-ปานกลาง	ต่ำ-ปานกลาง
การดูดซับ คาร์บอนแบบเกร็ด	ดีมาก	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง
NF	ยอดเยี่ยม	ปานกลาง	ปานกลาง-สูง

ที่มา : Jacangelo (1995)

**ตารางที่ 3** ข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่าง ๆ

กระบวนการที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย
โคแอกกูเลชัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>-เป็นทางเลือกที่ประหยัดที่สุด</li> <li>-สามารถทำได้โดยการปรับปรุงกระบวนการโคแอกกูเลชันที่มีอยู่แล้ว</li> <li>-มีข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการนี้มาก</li> <li>-หลังจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน อนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้ GAC ในขั้นตอนต่อมา</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ใช้สารส้มในปริมาณที่สูง ถ้า น้ำมีความขุ่นต่ำและมีค่าของสีสูง</li> <li>-ประสิทธิภาพในการกำจัดพอใช้ได้-ดี โดยกำจัด THMP ได้ &lt;60% และ DOC&lt;50%</li> </ul>
การดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด	<ul style="list-style-type: none"> <li>-สามารถกำจัดสี กลิ่นและรสออกจากน้ำ</li> <li>-ต้องการเวลาสัมผัสสั้น(10-15 นาที)</li> <li>-สามารถกำจัดสารปนเปื้อนอื่นด้วย (เช่นยาฆ่าแมลง)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC&lt;50% ,THMP29-56%</li> <li>-ข้อมูลในการใช้ต้องศึกษาเฉพาะแต่ละแห่ง</li> <li>-กำจัด Br<sup>-</sup> ได้น้อย</li> </ul>
โอโซน	<ul style="list-style-type: none"> <li>-สามารถกำจัดสี กลิ่นและรสออกจากน้ำ</li> <li>-สามารถใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคได้ด้วย</li> <li>-สามารถทำลายสารประกอบอินทรีย์ เช่นฟีนอลได้</li> <li>-ไม่ทำให้เกิดของแข็งละลายและฟิเอซของน้ำไม่มีผลต่อระบบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-สามารถทำปฏิกิริยากับ NOM เกิดเป็นสาร Ozonation By-products</li> <li>-สามารถทำปฏิกิริยากับ NOM และ Br<sup>-</sup> เกิดเป็นสาร Brominated By-products</li> </ul>

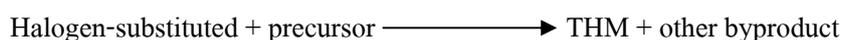
## สารไตรฮาโลมีเทน

### สารไตรฮาโลมีเทน

สารไตรฮาโลมีเทน (THMs) หมายถึง สารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารฮาโลเจนกับสารอินทรีย์มีสูตรทั่วไป  $CHX_3$  โดยที่ X อาจจะเป็นฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน หรือ ไอโอดีน ซึ่งมีทั้งหมด 10 ชนิด คือ ไตรคลอโรมีเทน (Chloroform ,  $CHCl_3$ ) โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM ,  $CHBr_2Cl$ ) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM ,  $CHBr_2Cl$ ) โบรโมฟอร์ม (Bromoform ,  $CHBr_3$ ) ไดคลอโรไอโอดีมีเทน ( $CHCl_2I$ ) ไดไอโอดีคลอโรมีเทน ( $CHClI_2$ ) โบรโมไดไอโอดีมีเทน ( $CHBrI_2$ ) คลอโรไดไอโอดีมีเทน ( $CHClI_2$ ) ไดโบรโมไอโอดีมีเทน ( $CHBr_2I$ ) และไตรไอโอดีมีเทน( $CHI_3$ )

### ปฏิกิริยาการเกิดสารไตรฮาโลมีเทน

สารไตรฮาโลมีเทนเกิดจากการที่ธาตุหมู่ 7 ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น สารฮิวมิก (aquatic humic substance, AHS) ซากพืชซากสัตว์ต่างๆ ที่เน่าเปื่อยอยู่ในน้ำ เป็นต้น



โดยที่สารฮาโลเจนจะทำให้สารอินทรีย์สลายตัว และเข้าแทนที่อะตอมของธาตุไฮโดรเจนของมีเทน (Methane) และสารไตรฮาโลมีเทนส่วนใหญ่่มักเกิดจากคลอรีน ( $Cl_2$ ) และโบรมีน ( $Br_2$ )

### การเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา

ในกระบวนการผลิตน้ำประปา (ส่วนวิจัยและพัฒนาคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง , 2547) สารไตรฮาโลมีเทนเกิดขึ้นจากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยคลอรีน (Disinfection byproduct) โดยที่คลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Precursors) เช่น ส่วนประกอบจากสาหร่าย, โปรตีน, สารอะโรมาติก และสารฮิวมิก (Aquatic humic substance, AHS) เป็นต้น

โดยทั่วไปสารไตรฮาโลมีเทนหลักที่พบในน้ำประปาได้แก่ คลอโรฟอร์ม (Chloroform) โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และโบรโมฟอร์ม (Bromoform) โดยสารทั้ง 4 ชนิดนี้เกิดควบคู่กันมีสมบัติดังตารางที่ 4 สำหรับมาตรฐานปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลกดังตารางที่ 5

**ตารางที่ 4** สมบัติต่างๆ ของสารไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิดหลัก

สารไตรฮาโลมีเทน	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล	จุดเดือด (°C)
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	$\text{CHCl}_3$	119.39	61-62
โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM)	$\text{CHBrCl}_2$	163.83	90.1
ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM)	$\text{CHBr}_2\text{Cl}$	208.29	120
โบรโมฟอร์ม (Bromoform)	$\text{CHBr}_3$	237.9	149-150

ที่มา : World Health Organization (1996)

**ตารางที่ 5** ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก

สารประกอบไตรฮาโลมีเทน	ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทน (µg/l)
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	< 200
โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM)	< 60
ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM)	<100
โบรโมฟอร์ม (Bromoform)	<100
ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes)	< sum of ratio ; THM ≤ 1

ที่มา : World Health Organization (1996)

Sum of ratio คิดจาก

$$\frac{C. \text{ Chloroform}}{G.V. \text{ Chloroform}} + \frac{C. \text{ BDCM}}{G.V. \text{ BDCM}} + \frac{C. \text{ DBCM}}{G.V. \text{ DBCM}} + \frac{C. \text{ Bromoform}}{G.V. \text{ Bromoform}} \leq 1$$

โดยที่ C = ปริมาณสารที่ตรวจพบในน้ำดื่ม

G.V. = ค่ากำหนดขององค์การอนามัยโลก

### ระบบการผลิตน้ำประปา

ระบบการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปมีจุดมุ่งหมายเพื่อกำจัดความขุ่นหรือสารแขวนลอยออกจากน้ำ ส่วนประกอบของระบบประกอบด้วย ขั้นตอนโคแอกกูเลชันเป็นการใช้สารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์หรืออนุภาคความขุ่น ขั้นตอนฟล็อกกูเลชันเป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์หรืออนุภาคความขุ่นที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ขั้นตอนการตกตะกอนเป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำ ขั้นตอน

การกรองเพื่อกำจัดอนุภาคความขุ่นขนาดเล็กที่เล็ดลอดออกมาจากขั้นตอนการตกตะกอน และขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคเพื่อให้ น้ำที่ผลิตได้มีความปลอดภัยจากเชื้อโรคก่อนทำการแจกจ่ายไปยังผู้บริโภคต่อไป

ระบบประปาแบบกรองโดยตรง (Direct Filtration) เป็นระบบการผลิตน้ำประปาที่ตัดขั้นตอนการตกตะกอนออกไปเป็นการนำน้ำที่เติมสารโคแอกกูแลนต์ แล้วมาผ่านเข้าสู่ชั้นกรองโดยตรงซึ่งชั้นกรองดังกล่าวจะช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสและบังคับให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันทำให้เกิดการชนกันและจับตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่และติดค้างอยู่บนผิวหน้าของชั้นเม็ดสารกรอง

ระบบกรองสัมผัส (Contact Flocculation – Filtration) เป็นระบบที่คล้ายกับระบบกรองโดยตรง แต่การรวมตะกอนจะเกิดขึ้นในช่วงที่กลุ่มตะกอนเล็ก ๆ สัมผัสกับตัวกลางที่ใช้ในการกรอง ซึ่งกลุ่มตะกอนจะรวมตัวกันและถูกกักเก็บอยู่ภายในช่องว่างชั้นกรอง

ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีการบำบัดน้ำขั้นสูงมาใช้ในการผลิตน้ำประปาเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำที่สูงขึ้น ได้แก่ กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption) กระบวนการเมมเบรน (Membrane process) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นต้น โดยที่นิยมนำกระบวนการ โคแอกกูแลชั่น และฟล็อกกูเลชั่น หรือกระบวนการดูดติดผิวมาใช้ร่วมกับกระบวนการเมมเบรนเพื่อยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนให้นานขึ้น (Kawamura, 2000)

### กระบวนการโคแอกกูแลชั่นและฟล็อกกูเลชั่น

กระบวนการโคแอกกูแลชั่นและฟล็อกกูเลชั่น คือการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ อยู่ในลักษณะที่ไม่มีเสถียรภาพในการแขวนลอยในน้ำและรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนขนาดเล็กมี 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค โดยทางใดทางหนึ่ง จะมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ภายใต้สภาพที่น้ำมีความปั่นป่วนอย่างรุนแรงซึ่งได้แก่ ขั้นตอนการกวนเร็ว (Rapid mixing) ในทางปฏิบัตินั่นเอง

2. การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) เพื่อเกาะกันเป็นกลุ่มตะกอนขนาดเล็ก การสร้างโอกาสในการสัมผัสกันของอนุภาคคอลลอยด์เหล่านั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการกวนผสม

Kawamura (1976) รายงานว่าปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ ชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ โดยในปัจจุบันเกลืออลูมิเนียม (Aluminum salt) ยังคงใช้ได้เป็นอย่างดี และกระบวนการโคแอกกูเลชันของเกลืออลูมิเนียมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเกลือในน้ำดิบ พีเอช อุณหภูมิ ชนิดและขนาดของอนุภาค การกวนผสม และความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ นอกจากนี้การใช้โพลิเมอร์เป็นสารโคแอกกูแลนท์มีข้อดีกว่าการใช้สารเคมีอื่น เนื่องจากสามารถใช้ในปริมาณที่น้อยลง เกิดสลัดจ์ (Sludge) น้อยและยังลดปัญหาเรื่องการปรับพีเอชและความเป็นด่าง (Alkalinity) ในน้ำอีกด้วย (Kawamura, 1976) สอดคล้องกับ Shea และคณะ (1971) โดยรายงานว่าการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ในระบบกรองสัมผัสจะทำให้ได้สลัดจ์ (Sludge) เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการตกตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้โพลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ซึ่งพบว่าใช้สารโพลิอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่น้อยกว่า และสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจะมาจากของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่อยู่ในน้ำดิบเดิมนั่นเอง นอกจากนี้การใช้สารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกันมีผลต่ออัตราการกรองของระบบกรอง Adin และ Rebbun (1974) ศึกษาพบว่าการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์เพียงสารเดียวในระบบกรองสัมผัสให้ได้ประสิทธิภาพควมมีอัตราการกรองอยู่ในช่วง 5 – 10 ลบ.ม./ต.ร.ม. – ชม. แต่การใช้โพลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกเป็นสารโคแอกกูแลนท์นั้นสามารถกรองในอัตราการกรองที่สูงได้ถึง 20 ลบ.ม./ต.ร.ม. – ชม. นอกจากนี้ พรชัย (2515) ทำการศึกษาการนำเครื่องกรองแบบหลายชั้นมาใช้กำจัดความขุ่นของน้ำดิบที่มีความขุ่นไม่เกิน 5 NTU โดยไม่เตรียมน้ำก่อนกรองพบว่าประสิทธิภาพการกรองมีเพียง 40 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้ สารส้มเตรียมน้ำก่อนกรองพบว่าสามารถกำจัดความขุ่นได้มากขึ้น

ความเป็นกรดหรือด่างของน้ำมีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดย Dempsey และคณะ (1985) พบว่า Polyaluminium Chloride (PACl) ใช้ได้ดีกว่าสารส้มเมื่อ pH สูงกว่าหรือต่ำกว่า pH ที่เหมาะสมของสารส้ม และ PACl ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้มเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำ ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำถึงปานกลางพบว่า PACl เป็นสารโคแอกกูแลนท์ที่ดีกว่าสารส้ม โดยเฉพาะที่ pH ที่น้อยกว่า 5 และมากกว่า 7 Kawamura และ Trussell (1991) กล่าวว่าประสิทธิภาพ

ของ PACI ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบและค่อนข้างได้ผลในน้ำที่มีความเป็นด่าง (Alkalinity) ต่ำ ความขุ่นสูง (> 30 TU) โดยเฉพาะในสภาพอากาศหนาว แต่มีข้อเสียตรงที่ PACI มีราคาแพงมากกว่าสารส้มถึงแม้ว่าจะใช้ในปริมาณที่ต่ำกว่า

### ปริมาณที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์

ความล้มเหลวของกระบวนการ โคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชันในกระบวนการปรับคุณภาพน้ำ พบว่าส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่ไม่เหมาะสม การเติมสารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่น้อยเกินไปอาจทำให้ไม่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในขณะที่ปริมาณที่มากเกินไปจะนำไปสู่การกลับคืนสู่การมีเสถียรภาพอีกครั้งของประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ โดยปริมาณที่เหมาะสมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์ ในปัจจุบันกระบวนการ โคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชันยังพัฒนาไม่เพียงพอที่จะบอกได้ถึง การเลือกปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์โดยปราศจากการทดลอง ซึ่งการทดลองครั้งนี้ใช้วิธีจาร์เทสต์ในการหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบอย่างง่าย ๆ โดยทำการทดลองในบีกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ ส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ชุด ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และกำหนดสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ ระยะเวลากวนน้ำ และระยะเวลาในการตกตะกอนแล้วจึงทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ส่วนระดับ pH อาจแปรเปลี่ยนหรือคงที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลอง จากการทดลองจะได้ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ และระดับ pH ที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการ โคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน แม้ว่าการทดลองจาร์เทสต์จะเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันก็จริงแต่วิธีนี้ยังมีข้อบกพร่องคือ บีกเกอร์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะแตกต่างจากสภาพความเป็นจริงถึงแม้ว่าจะพยายามกำหนดตัวแปรต่างๆ ในการทดลองให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง แต่อิทธิพลดังกล่าวทำให้ตัวแปรที่มีค่าแตกต่างไปจากความเป็นจริง

โดยทั่วไปจาร์เทสต์สามารถบอกได้เพียงสารโคแอกกูแลนต์ ที่เหมาะสม แต่ความเข้มข้นและความแข็งแรงของกลุ่มตะกอนสามารถหาได้ดีที่สุดจากการศึกษาใน Pilot Plant เท่านั้น นอกจากนี้ นักวิจัยบางท่านระบุว่าข้อมูลการกำจัดสารแขวนลอยที่ได้จากจาร์เทสต์ และถึงปฏิบัติการ

แบบไหลต่อเนื่องมีความแตกต่างกัน ในการทดลองส่วนใหญ่พบว่าจาร์เทสต์ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยที่ดีกว่าในถังปฏิกิริยาแบบไหลต่อเนื่อง

### การกรอง

การกรองน้ำเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยหรืออนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมาติดค้างในช่องว่างหรือติดไว้บนผิวของตัวกลางหรือสารกรอง

#### หลักการกรองอนุภาค

หลังจากที่อนุภาคคอลลอยด์ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันแล้ว จะเข้าสัมผัสกับตัวกลาง (Media) ที่ใช้ในการกรองโดยอาศัยช่องว่างในตัวกลาง เป็นส่วนสร้างโอกาสสัมผัสของอนุภาค หรือที่เรียกว่าการกรองสัมผัส (Contact Flocculation Filtration) และขยายขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถถูกกักเก็บไว้ในช่องว่างของตัวกลาง และเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวกลาง จะชักนำให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันแล้วหลุดเข้าไปในชั้นตัวกลาง ได้ลึกยิ่งขึ้น ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพของการกรองน้ำขึ้นอยู่กับตัวกลางเป็นปัจจัยหลัก นั่นคือหากตัวกลางมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสำหรับการสัมผัสและเกาะจับสูงสามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ดี แต่ขณะเดียวกันหากมีช่องว่างในสารกรองน้อยส่งผลทำให้มีการอุดตันสูงและมีอายุการกรองที่ต่ำ

O'Melia and Stumm (1969) ได้เสนอแนะว่าหลักการกำจัดสารแขวนลอยในตัวกลาง จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของสารแขวนลอย ตัวกลาง ลักษณะทางเคมีของน้ำและอัตราการกรอง การกำจัดสารแขวนลอยจะเกิดขึ้นภายในตัวกลาง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการทำงานที่ต่อเนื่องกัน 2 กลไก คือ กลไกการเคลื่อนย้าย (Transport mechanism) สารแขวนลอยในน้ำให้เข้าไปหาสารกรองซึ่งอยู่นิ่ง ๆ และกลไกการทำให้สารแขวนลอยเกาะจับอยู่กับตัวกลาง หรือสิ่งที่ติดอยู่บนตัวกลางก่อนแล้ว (Attachment mechanism)

## 1. กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาตัวกลาง (Transport mechanism)

เป็นการกำจัดสารแขวนลอยออกจากเส้นทางการไหลของน้ำ (Streamline) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยทำให้อนุภาคแขวนลอยเข้ามาใกล้ชิดกับตัวกลาง การกระทำดังกล่าวจะขึ้นกับปัจจัยทางชลศาสตร์กายภาพ (Physico-hydraulic factor)

กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาตัวกลางนั้น หากพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในชั้นของตัวกลางตามขนาดของอนุภาคแขวนลอย สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1.1 การเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ระดับ โมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

1.2 การเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในหลายลักษณะคือ

1.2.1 การติดค้าง (Interception) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยเบียดเข้าหาตัวกลางในขณะที่ผ่านช่องว่างของตัวกลางและติดค้างอยู่ในช่องว่างของตัวกลางนั้น

1.2.2 แรงกระทำทางพลศาสตร์ (Hydrodynamic action) เป็นแรงกระทำทางพลศาสตร์ ส่งผลทำให้อนุภาคแขวนลอยเคลื่อนที่เข้าปะทะกับตัวกลาง

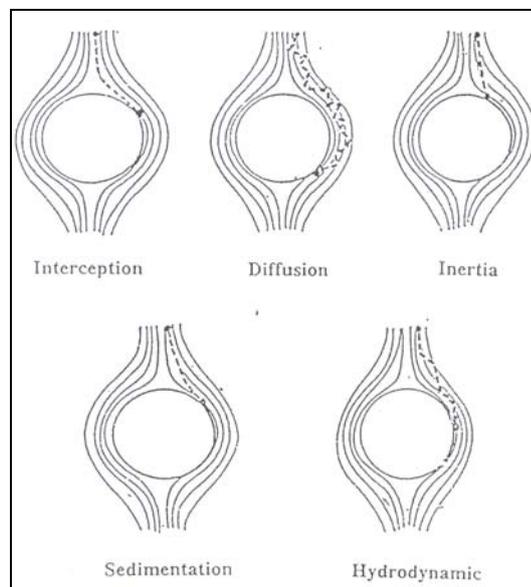
1.2.3 แรงเฉื่อย (Inertia) อนุภาคแขวนลอยจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวกลางโดยอาศัยแรงเฉื่อยในอนุภาค

1.2.4 การตกตะกอน (Sedimentation) อนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่จะตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาตัวกลางได้ ซึ่งการตกตะกอนเป็นผลมาจากแรงดึงดูดของโลกทำให้อนุภาคมีความเร็วในการตกตะกอนมากจนสามารถแยกตัวออกจากเส้นทางการไหลของน้ำ

## 2. กลไกการจับสารแขวนลอย (Attachment Mechanism)

เป็นการเกาะติดของอนุภาคแขวนลอยบนพื้นผิวของตัวกลาง หรือสิ่งอื่นที่ติดอยู่บนตัวกลางแล้ว การจับอนุภาคแขวนลอยอาศัยกลไกการเคลื่อนย้ายนำเอาอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กจากเส้นทางน้ำพาเข้าใกล้ผิวหน้าของตัวกลาง เมื่ออนุภาคเข้าใกล้ผิวหน้าตัวกลางมากขึ้น นั่นหมายถึงอนุภาคแขวนลอยได้ถูกจับเข้ากับตัวกลางแล้ว

ในระหว่างการกรองน้ำ หากตัวกลางมีความฝืดหรือเกิดการอุดตันมากขึ้น แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตามด้วย เป็นผลทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ติดอยู่บนตัวกลางบางส่วนหลุดออกมาจากตัวกลางได้ด้วยกลไกที่เรียกว่า Detachment mechanism นอกจากนั้นกลไกดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้หากมีการเพิ่มอัตราการกรองอย่างกะทันหัน ซึ่งจะทำให้น้ำที่กรองได้มีตะกอนขุ่นติดออกมา หรืออาจเกิดเนื่องจากพื้นที่ว่างบนตัวกลางถูกใช้ไปจนเกือบหมดแล้ว ทำให้อนุภาคแขวนลอยมีโอกาสเกาะติดบนผิวตัวกลางได้น้อย ดังนั้นจึงมีการหลุดของอนุภาคแขวนลอยออกจากตัวกลางเพิ่มขึ้น



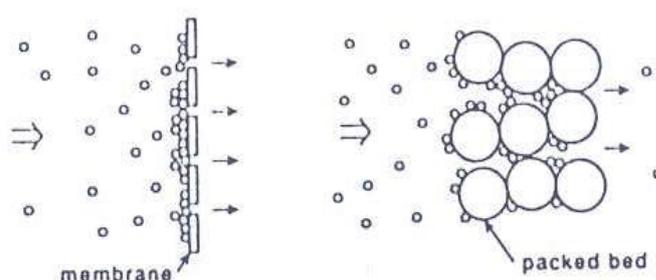
**ภาพที่ 1** แสดงกลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาตัวกลางหรือสารกรอง

ที่มา: Ives (1970)

### การกรองอนุภาคด้วยเม็ดพลาสติก

ในการผลิตน้ำประปาทั่วไปนิยมใช้การกรองน้ำแบบติดค้างในชั้นกรอง ซึ่งสารกรองที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทราย แต่เนื่องจากการใช้ทรายมักเกิดการอุดตันเร็ว และมีปัญหาการเรียงตัวของเม็ดทรายหลังการล้างย้อน จึงมีการคิดนำตัวกลางลอยคือเม็ดพลาสติกมาใช้เป็นตัวกลางเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

ลักษณะการกรองตรงโดยใช้เม็ดพลาสติกและเมมเบรนเป็นตัวกลาง จะมีลักษณะการกรองที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 2



**ภาพที่ 2** แสดงการเปรียบเทียบการกรองผ่านเมมเบรนและการกรองผ่านตัวกลาง

ที่มา : Ho and Sirkar (1992)

จากการทดลองของ Madeesuksatid (1994) ที่ใช้เม็ดพลาสติกโพลีสไตลีน (PS) ขนาดเท่ากับ 1.1 มม. และโพลีโพรพิลีน (PP) ขนาด 2.57 มม. เป็นตัวกลางและพบว่าความสูงของตัวกลางที่เหมาะสมที่สุดคือ PS:PP เท่ากับ 50:60 ซม. ที่อัตราการกรองเท่ากับ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และ Sundarakumar (1996) พบข้อดีของตัวกลางลอย (Floating Media filter) คือง่ายและประหยัดในการล้างย้อน Visvanathan et al. (1996) ใช้ตัวกลางลอย (Floating media filter) เป็นเม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) และโพลีสไตลีน (Polystyrene) แทนทรายและแอน ทราไซต์ พบว่าการใช้ตัวกลางลอยจะส่งผลดีตรงที่สามารถลดความถี่ในการล้างย้อนและใช้ปริมาณน้ำล้างย้อนลดลง ลดปัญหาการผสมกันของตัวกลางในระหว่างการล้างย้อน ตลอดจนตัวกลางลอยจะมีราคาถูก ใช้งานง่าย ดูแลรักษาง่ายและล้างย้อนง่าย

นอกจากนั้น Sundarakumar (1996) ทำการศึกษาตัวกลางลอยพบว่าการล้างยอนของตัวกลางลอยสามารถประหยัดน้ำในการล้างยอนได้ถึง 30% เมื่อเทียบกับตัวกลางชนิดอื่น ๆ และต่อมาได้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยใช้ทรายและเม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีนเป็นตัวกลาง โดยชันยาภรณ์ (2540) พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ความสูงของชั้นตัวกลางเท่ากับ 40:40 ที่อัตราเร็วในการกรองเท่ากับ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. โดยมีการสูญเสียความดันต่ำสุดเท่ากับ 40.4 ซม. และวิธีการล้างยอนโดยใช้อากาศตามด้วยน้ำ เป็นวิธีที่ใช้เวลาและปริมาณน้ำล้างยอนน้อยที่สุด

หลังจากนั้นได้มีการทดลองโดยใช้ตัวกลางลอยเป็นเม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีนเพียงชนิดเดียวโดยอัญชลี (2543) พบว่าที่ความสูงชั้นเม็ดพลาสติก 1.5 ม. ที่อัตราการกรอง 10 และ 15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับน้ำสังเคราะห์ความขุ่น 20 และ 40 NTU และวิธีการล้างยอนระบบกรองสัมผัสที่เหมาะสม คือ ใช้อากาศที่แรงดัน 100 kPa เป็นเวลา 1 นาที และตามด้วยน้ำเป็นเวลา 3 นาที ต่อมาทิพย์สุรีย์ (2546) ได้ศึกษาถึงกลไกการกำจัดอนุภาคออกจากน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่นโดยการกรองผ่านตัวกลางเม็ดพลาสติกลอยโพลีโพรพิลีน ร่วมกับเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันและใช้สารสร้างตะกอนคือ Alum, FeCl<sub>3</sub>, PACl พบว่าในขั้นตอนการกรองผ่านตัวกลางเม็ดพลาสติกลอยโพลีโพรพิลีน สามารถกำจัดความขุ่นจาก 80 NTU ให้เหลือประมาณ 3.34-33.42 NTU (มีประสิทธิภาพการกำจัด 95.83-58.23%) ความขุ่นจาก 160 NTU เหลือประมาณ 11.66-105.99 NTU (มีประสิทธิภาพการกำจัด 92.71-33.76%) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14.27-36.83 ไมครอน ปริมาณสารแขวนลอย 3.33-56.67 มก./ล. และแรงดันสูญเสียสูงสุด 14.60 เซนติเมตร เมื่อเวลาถึงชั่วโมงที่ 6 ซึ่งพบว่าระดับความขุ่นของน้ำดิบ ขนาดอนุภาคดินและอัตราการกรองผ่านเยื่อกรองส่งผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองและความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น รวมทั้งคุณภาพน้ำที่กรองได้ โดยระบบทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์และการใช้ชั้นกรองเม็ดพลาสติกลอยร่วมกับเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันมีความดันสูญเสียผ่านเยื่อกรองต่ำกว่าการใช้เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันอย่างเดียว

การศึกษาของสุนิสตา (2546) รายงานว่าสถานะการทำงานและประสิทธิภาพของการกรองตรงผ่านตัวกลางเม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีน โดยใช้น้ำดิบที่ใช้ในโรงกรองน้ำบางเขน ในช่วงความขุ่นสูง(ประมาณ 85 NTU) และช่วงความขุ่นต่ำ (ประมาณ 30 NTU) โดยมีสารสร้างตะกอนที่ใช้คือ Alum, FeCl<sub>3</sub>, PACl และ Alum/Lime/Polymer พบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำที่เหมาะสมที่สุด ทั้งในช่วงความขุ่นต่ำและช่วงความขุ่นสูงโดยคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ใกล้เคียงกัน แต่

PACI ให้ระยะเวลาการทำงานนานที่สุดคือ 24 ชั่วโมง และให้ค่าพลังงานสูญเสียต่ำสุดคือ 15 ชม. และพบว่าอัตราการกรองของระบบที่เหมาะสมทั้งน้ำดิบความขุ่นต่ำและความขุ่นสูง สำหรับชั้นกรองเม็ดพลาสติกลอยคือ 15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. โดยพิจารณาปริมาณน้ำที่ผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ที่มากที่สุดและคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปบำบัดในขั้นตอนต่อไปโดยใช้ เมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันได้ดี โดยปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม สำหรับชั้นกรองพลาสติกลอยที่อัตราการกรอง 5, 10 และ 15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ในกรณีน้ำดิบความขุ่นต่ำพบว่า ปริมาณ PACI ที่เหมาะสมเท่ากับ 100%, 100% และ 50% ของปริมาณที่ได้จากจาร์เทสต์ และในกรณีน้ำดิบความขุ่นสูง ปริมาณ PACI ที่เหมาะสมเท่ากับ 100%, 50% และ 50% ของปริมาณที่ได้จากจาร์เทสต์ สำหรับอัตราการกรอง 5, 10 และ 15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ

#### กระบวนการดูดติดผิว

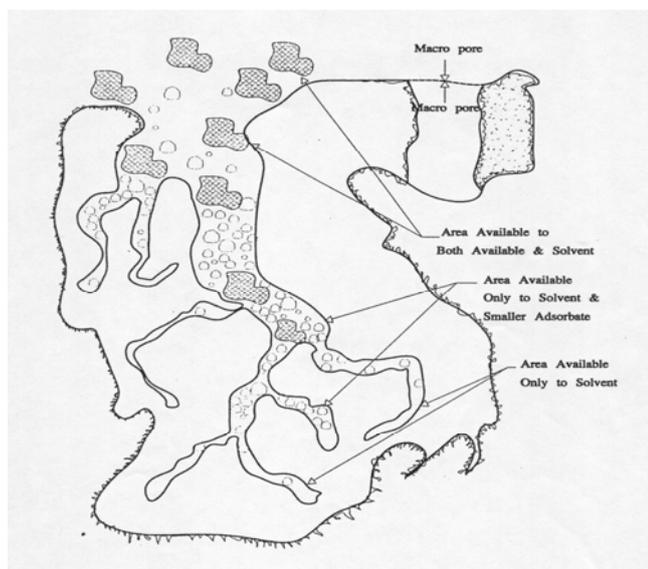
การดูดติดผิวโดยทั่วไปเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของแข็ง-ของแข็ง ก๊าซ-ของเหลว ของเหลว-ของเหลว หรือ ของเหลว-ของแข็ง ในการใช้ถ่านเป็นตัวดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของแข็งและของเหลวการดูดติดผิวแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือการดูดติดผิวทางฟิสิกส์ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) กล่าวคือเมื่อ โมเลกุลของสารใดๆ ในของเหลวเคลื่อนตัวมาสัมผัสบริเวณผิวของของแข็งซึ่งเป็นผลมาจากแรงดูดของตัวดูดติดผิว (Adsorbent) ที่มีต่อโมเลกุลนั้นมากกว่าพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของโมเลกุล (Adsorbate) โมเลกุลของสารในของเหลวจะเกาะติดกับโมเลกุลของของแข็งด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) ขั้นตอนนี้เป็นการดูดติดผิวทางฟิสิกส์ การเกาะตัวของโมเลกุลของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเป็นขั้นๆ ตามความเข้มข้นของสารละลายจากนั้นจะเกิดการดูดติดผิวทางเคมีขึ้น โดยมีพลังงานหนึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวดูดติดผิว และตัวถูกดูดติดผิวกลายเป็นสารประกอบเคมีใหม่ขึ้น ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้ (Irreversible) ตรงข้ามกับการดูดติดผิวทางฟิสิกส์สามารถแปรสภาพกลับได้ (Reversible) ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

ในกระบวนการดูดติดผิวโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดเข้ามาอยู่ในชั้นแรกจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดติดผิวได้ จึงเกิดการดูดติดผิวทั้งทางฟิสิกส์ และเคมี ส่วนการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นต่อ ๆ ไป จะเกิดการดูดติดผิวทางฟิสิกส์เท่านั้น ซึ่งรูปแบบของจำนวนชั้น

ของโมเลกุลที่ดูดติดผิวทางฟิสิกส์จะมีความสำคัญต่อการเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการดูดติดผิว หรือการคำนวณไอโซเทอมการดูดติดผิว

### กลไกการดูดติดผิว

การดูดติดผิวสิ่งสกปรกที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ ในระยะแรกโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่าน ในระยะที่สองโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะฟุ้งกระจาย (Diffusion) เข้าไปในรูของเม็ดถ่าน ดังแสดงในภาพที่ 3 ดังนั้นอัตราการดูดติดนี้จึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายเข้าไปตามรูพรุนของเม็ดถ่าน อัตราการดูดติดผิวนี้จะแปรผกผันกับกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล และจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำ และจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุล นอกจากนี้ยังแปรผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับถ่าน และจะเพิ่มขึ้นถ้าค่าพีเอชของน้ำลดลง (เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2525) ความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของถ่าน และชนิดของสารที่จะถูกดูดติด ดังนั้นการใช้ถ่านดูดติดผิวจึงจำเป็นต้องศึกษาทดลองเพื่อหาถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละการใช้งาน



**ภาพที่ 3** การดูดติดผิวของสิ่งสกปรกบนถ่านกัมมันต์

ที่มา : Cheremisinoff and Morresi (1978)

### อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ขั้นตอนในการดูดซับของสารละลายโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุน ได้แก่

- การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของสารที่ละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

- การขนส่งชั้นผิวหน้าของตัวดูดซับ (Surface transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ตัวดูดซับ การขนส่งในขั้นนี้เป็นกระบวนการที่เกิดการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลว (Surface diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

- การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลสารที่ละลายในของเหลวเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

### ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (Factors affecting adsorption)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่

- ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ภายนอก หรือการแพร่ภายใน ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเนื่องจากไม่ถูกรบกวน ซึ่งจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสารเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ภายในจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ด้วยเหตุ

นี้ในกรณีความปั่นป่วนสูงอัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับการแพร่ภายใน และในกรณีความปั่นป่วนต่ำอัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับการแพร่ภายนอก

- ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว ส่วนพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorptive Capacity)

- ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดผิว เมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการถูกดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดติดผิวได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นนี้ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวได้ยากเช่นกัน แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจจะเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถกล่าวได้อย่างเต็มที่มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิว และความสามารถในการละลายน้ำ

- ขนาดของสารที่ถูกดูดติดผิว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดติดผิว จากการวิจัยพบว่าการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง

- พิเอช การแตกตัวเป็นไอออนและความสามารถในการละลายน้ำของสารละลายต่างๆ จะขึ้นอยู่กับค่าพิเอช ดังนั้นพิเอชจึงมีผลต่อการดูดติดผิวด้วย

- อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ในทางกลับกันขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

- ระยะเวลาในการดูดติด ระยะเวลาในการดูดติด หมายถึงเวลาสัมพัทธ์ต้องมีมากพอที่ทำให้เกิดการดูดติดเพื่อจะเข้าสู่สภาวะสมดุล

### สมดุลของการดูดซับ

Adsorption isotherm คือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำแล้วนำไปพลอตกราฟลอการิทึมโดยให้ความเข้มข้นสารที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนนอน และ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับไปต่อ น้ำหนักตัวดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า Adsorption isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำ และเพื่อเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับที่ดีที่สุด Adsorption isotherm มีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากที่สุดคือ ของ Langmiur theory และของ Freundlich theory

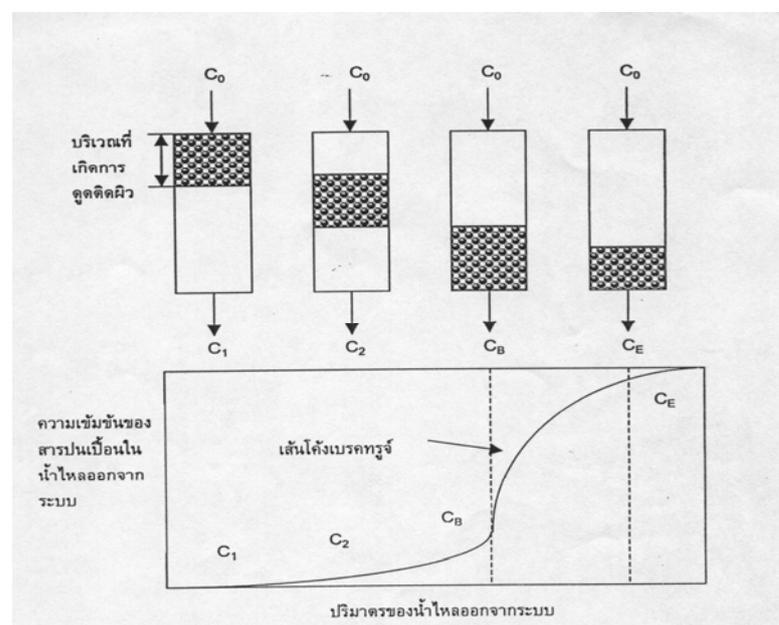
จาก Isotherm test สามารถเลือกชนิดถ่านที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อการออกแบบ จะต้องมีการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์เพื่อหาอายุการใช้งานของถ่านชนิดที่เลือกเอาไว้แล้วว่ามีอายุยาวนานเท่าไรจึงจะเสื่อมคุณภาพ

เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นเม็ดถ่าน เม็ดถ่านชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อนและชั้นของเม็ดถ่านที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาการใช้งาน ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้ว จะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนในที่สุดความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุดที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จุดนี้เรียกว่า Breakthrough point และเส้นโค้ง เรียกว่า Breakthrough curve ดังภาพที่ 4 เวลานั้นจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึง Breakthrough point เรียกว่า Breakthrough time และจะมีค่าลดลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านลดลง เม็ดถ่านมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น Breakthrough time จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของคอลัมน์เพื่อให้ชั้นถ่านมากขึ้น ลดอัตราการไหล ลดความเข้มข้นของสารในน้ำที่เข้าสู่ระบบกำจัด และลดขนาดของเม็ดถ่านเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว

### การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านชั้นถ่าน

Down flow ให้น้ำไหลผ่านโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก แต่เมื่อด่านเสื่อมสภาพจะต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่หมดทั้งคอลัมน์

Up flow ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นถ่านขึ้นข้างบน แต่มีข้อดีคือ สามารถฟื้นฟูสภาพของชั้นถ่านที่หมดสภาพแล้วได้เป็นระยะๆ โดยเอาออกทางข้างล่างของคอลัมน์



**ภาพที่ 4** ลักษณะของเส้นโค้งเบรคทวร์จสำหรับชั้นถ่านที่อยู่กับที่ตามทฤษฎี

ที่มา : Clark and Lykins (1989)

### ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หมายถึงผลิตภัณฑ์ถ่านที่มีอยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) คือรูปร่างไม่แน่นอน สัณฐานที่ขึ้นจากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกระบวนการเผาในที่อับอากาศ และผ่านกระบวนการกระตุ้นซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากสารเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (Elementary crystallites) เพิ่มมากขึ้น ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเหมือน

แกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของหัวดินสอ และเพชร เพราะต่างก็มีคาร์บอน (Carbon) เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน แต่สิ่งที่แตกต่างจากแกรไฟต์ และเพชร คือการที่มันมีรูปร่างแบบ Random imperfect structure ซึ่งมีรูพรุนมากมาย รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าไปจนถึงเล็กขนาดระดับโมเลกุล โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่วุ้นนี้ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำนวนมากและมีความสามารถสูงในการดูดซับสิ่งสกปรก ถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความสามารถและพื้นที่ในการดูดซับสิ่งสกปรกมากที่สุดเท่าที่มนุษย์เคยรู้จักมา โดยถ่านกัมมันต์จะต้องมีพื้นที่ผิวอย่างน้อยที่สุด 5 ตารางเมตรต่อกรัม (Rouquerol et al.,1999) โดยทั่วไปโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวสูงอยู่ระหว่าง 500-2,000 ตารางเมตรต่อกรัม โครงสร้างเป็นรูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่  $20^{\circ}\text{A}$ - $20,000^{\circ}\text{A}$  และมีคุณสมบัติดูดซับสิ่งสกปรกต่างๆ ได้ดี ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากกว่า  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  นั้นหมายความว่า 5 กรัมของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ประมาณสนามฟุตบอล นั่นแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมาก

เริ่มมีการกล่าวถึงการดูดซับสิ่งสกปรกของธาตุคาร์บอนครั้งแรกซึ่งเป็นสารดูดซับ (Adsorbent) ตั้งแต่ 1550 ปีก่อนคริสตกาล โดยชาวอียิปต์โบราณ ซึ่งใช้กกพาไพร์สเป็นวัสดุดูดซับ ต่อมาก็มีการใช้โดยชาวกรีกชื่อ Hippocrates ซึ่งเป็นบิดาแห่งแพทยศาสตร์ และปราชญ์ชาวโรมันชื่อ Pliny โดยวัตถุประสงค์หลักด้านการแพทย์ หลังจากนั้นในศตวรรษที่ 18 ถ่านก็ถูกนำมาใช้อีกครั้งอย่างแพร่หลายในวัตถุประสงค์ต่างๆ โดยเริ่มจากค.ศ. 1773 ความสามารถในการดูดซับสิ่งสกปรกของถ่านได้ถูกรื้อฟื้นอีกครั้งโดย Scheels และในปีเดียวกันเอง Kehl ได้ใช้ถ่านเพื่อกำจัดกลิ่นเหม็นจากแผลเน่าเปื่อย ต่อมา ค.ศ. 1811 มีการค้นพบที่สำคัญเกี่ยวกับความสามารถในการขจัดสีของถ่านกระดูก (Bone char) ซึ่งนำไปสู่การนำไปใช้ในการฟอกสีน้ำตาล ในช่วงแรกผงของถ่านกระดูกเมื่อใช้เสร็จแล้วก็ทิ้งไป แต่การที่วัสดุดูดซับมีจำกัดจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) วิธีการนำกลับมาใช้ใหม่จึงมีการพัฒนาต่อมา

ในปีค.ศ. 1822 Bussy ใช้ Potash ( $\text{K}_2\text{O}$ ) นำมาผลิต Blood Char ซึ่งในสถานะห้องทดลอง Blood char ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสิ่งสกปรกสูงมาก สามารถใช้ได้ Blood char ได้นานนับปี โดยต่อมาปีค.ศ. 1862 Lipscombe เตรียมคาร์บอนเพื่อใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์

### วัตถุดิบที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จะพิจารณาจากอินทรีย์วัตถุ (องค์ประกอบของคาร์บอน และไฮโดรเจน) การศึกษาต่อมาพบว่าชนิดของถ่านกัมมันต์ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ต่าง ๆ คือ (เกศรา, 2531)

- ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากตัวกระตุ้นทางด้านเคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ และทางด้านกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

- ขนาดรูพรุนบนผิวคาร์บอน ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย รูพรุนขนาดกลาง (Transitional pores or mesopores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15-100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสีและการผลิตยา

- ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ ถ้าความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำให้น้ำบริสุทธิ์ ถ้าความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับก๊าซพิษหรือไอระเหย

- ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ กรณีสารที่ถูกดูดซับเป็นก๊าซ (Gas adsorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษและไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากคาร์บอนแข็งและมีความแข็ง (Hard artificial char) เป็นวัตถุดิบในการผลิต ส่วนสารที่ถูกดูดซับเป็นสี (Color adsorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนแข็งที่ไม่แข็ง (Soft artificial char) และกรณีสารที่ถูกดูดซับเป็นโลหะ (Metal adsorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกโลหะต่าง ๆ เช่น แยก ทอง เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

- รูปร่างลักษณะของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder activated carbon , PAC) ทำได้โดยการเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวิธีการบด ซึ่ง

จะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดติดผิวแตกต่างกันไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสถานะที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีขนาด 5-100 ไมโครเมตร สำหรับถ่านกัมมันต์แบบผงที่มีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่าการเติมถ่านกัมมันต์แบบผง อาจกระทำพร้อมกับการเติม โคลแอกกูแลนท์ก็ได้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำ กลายเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง ด้วยเหตุนี้ ถ่านกัมมันต์ผงจึงนิยมเติมก่อนกระบวนการตกตะกอนหรือการกรองน้ำ ถ่านกัมมันต์แบบผงใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่น และแต่งรสของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำน้ำตาล ให้บริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง มีรสดีขึ้น ช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ในการทำน้ำประปาให้มีรสและกลิ่นดีขึ้น ใช้ในการทำน้ำอัดลม หรือน้ำหวานบรรจุขวด นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์แบบผงยังใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆอีก เช่น ผงชูรส เครื่องดื่มประเภทเบียร์และไวน์ ขี้ผึ้ง พลาสติก ก๊าซพิษ และในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (Granular activated carbon , GAC) ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ด หรือแบบผงทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน (Binding agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์ (Tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ได้แก่ วัตถุดิบที่ค่อนข้างแข็งและมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทรายกรองน้ำ แข็งแต่เปราะและเบากว่าทราย ถ่านกัมมันต์เกร็ดสามารถบรรจุถังให้น้ำไหลผ่านในลักษณะที่คล้ายกับการกรองน้ำ เวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียดกับถ่าน อยู่ในช่วง 10-30 นาที น้ำเสียดก่อนที่จะเข้าถึงถ่านต้องกำจัดตะกอนแขวนลอยออกให้มากที่สุดก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้อำนาจการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงเนื่องจากถูกอุดตันเร็วเกินไป ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษ และไอของสารละลายอินทรีย์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ ซึ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมยาสั่งเคราะห์ อุตสาหกรรมฟิล์มโปร่งใส อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมเคลือบผ้า อุตสาหกรรมก๊าซ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเชิงปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซ และใช้เป็นวัสดุทำหน้ากากป้องกันก๊าซ และไอพิษต่างๆ

### **คุณสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์**

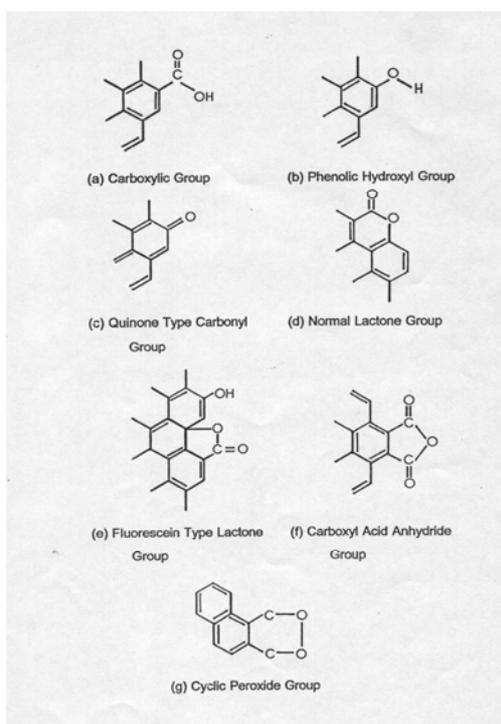
ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำ จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำ ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ Cheremisinoff and

Ellerbusch (1987) ได้อธิบายสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน พื้นที่ผิว (Surface area) โดยทั่วไปถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดติดผิวมาก ความหนาแน่นประจักษ์ (Apparent density) ใช้ในการประเมินความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่าน (Carbon regeneration) ความหนาแน่นของก้อน (Bulk density) ใช้ในการประเมินปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน ขนาดใช้งาน (Effective size) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity coefficient) ใช้ในการประเมินภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic condition) ของถังดูดติดผิว (Adsorption column) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ใช้ในการประเมินการดูดติดผิวโมเลกุลน้ำเสีย ซีฟแอนาไลซิส (Sieve analysis) เป็นตัวตรวจสอบ Plant-handling effects ของถ่าน แอบราชัน นัมเบอร์ (Abrasion number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash) บอกรถึงปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ ความชื้น (% Moisture) บอกรถึงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการประเมินความสามารถของถ่านในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิว (Carbon regeneration) โมลาสนัมเบอร์ (Molasses number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และขนาดของรูพรุน (Pore size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดติดผิวโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

### โครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Surface functional group)

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่นๆ ได้ เช่น อะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจน ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต ทั้งในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน และการเกิดพันธะเคมีบนพื้นผิวในขั้นตอนการกระตุ้น การที่มีอะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อเกิดการรวมตัวกับอะตอมคาร์บอน โดยเกิดพันธะเคมีจะเกิดเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอล (Functional group) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ กลุ่มฟังก์ชันนอลที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบได้บ่อยๆ ได้แก่ Carbonyl group, Phenolic hydroxyl group, Quinone type carbonyl group, Normal lactones group, Fluoresceintype group, Carboxylic acid anhydrides group และ Cyclic peroxide groups ดังแสดงในภาพที่ 5 ในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ยังเกิดเถ้า (Ash) ซึ่งเถ้าและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ายังมีหลากหลายอีกด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายจะทำให้พีเอชของสารละลายเปลี่ยนแปลงก็ยังสามารถแสดงความเป็นกรดหรือเป็นด่างได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณของอะตอมออกซิเจนบนพื้นผิวมากก็จะแสดงความเป็นกรด ซึ่งพื้นผิวที่เป็นกรดนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนน้อยแสดงความเป็นด่างซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Lahaye, 1998)



### ภาพที่ 5 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

ที่มา: Cookson (1978)

### การฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิว (Carbon regeneration)

เมื่อถ่านดูดติดผิวถูกใช้งานไปเป็นเวลานาน รูพรุนของเมล็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรก ทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว เนื่องจากถ่านดูดติดผิวมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดราคาค่าใช้จ่ายในการกำจัดจะต้องนำถ่านดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพ (Exhausted carbon) มาฟื้นฟูเพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานอีก การฟื้นฟูถ่านดูดติดผิวโดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดตันอยู่ในรูของถ่านดูดติดผิวอาจทำได้หลายวิธี

(Lyman, 1987) ได้แก่ การใช้ความร้อนในการฟื้นฟูสภาพ (Thermal reactivation) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากถ่านดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมกับน้ำมีลักษณะขุ่น (Slurry) นำเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ หลังจากนั้นทำการแยกน้ำ (Dewater) ออกจากถ่านดูดติดผิวแล้วส่งเข้าเตาเผาที่เรียกว่า Multiple hearth furnace หรือ Rotary kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870-980 องศาเซลเซียส ระหว่างนี้ถ่านจะถูกทำให้แห้ง และการเผาไหม้จะทำให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์บนผิวหน้า และในรูพรุนของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอและถูกเผาทำลายตัวไป ในขั้นตอนการเผานี้จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนเพื่อให้ความร้อนทำลายโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่ติดผิวถ่าน แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่าน (Cheremisinoff and Morresi, 1978) หลังจากนั้นถ่านดูดติดผิวที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำ (Quenching) แล้วนำไปล้างแยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงสูบล้างไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน การฟื้นฟูคุณภาพของถ่านดูดติดจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4,000-5,000 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์ ในแต่ละขั้นตอนถ่านจะสูญหายไปประมาณร้อยละ 4-9 การใช้ด่างในการฟื้นฟูสภาพ (Alkaline regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูดูดติดผิว หรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นกรด การใช้กรดในการฟื้นฟูสภาพ (Acid regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูดูดติดผิว หรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นด่าง การใช้ตัวทำละลายในการฟื้นฟูสภาพ (Solvent regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูดูดติดผิวกลุ่มสารอินทรีย์ การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพ (Stream regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูดูดติดผิวที่เป็นไอได้ง่าย และการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีทางชีววิทยา (Biological regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูดูดติดผิวที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น สารอินทรีย์

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบผลิตน้ำประปา

Taylor et al. (1987) ใช้กระบวนการเมมเบรน 3 ชนิด คือ RO NF และ UF ในการกำจัดสาร THMP ออกจากน้ำบาดาล และน้ำผิวดิน พบว่าต้องการเมมเบรนที่มีค่า MWCO น้อยกว่าหรือเท่ากับ 400 ในสภาวะปกติในการดำเนินระบบ เพื่อควบคุม THMP และสรุปผลการวิจัยว่ากระบวนการเมมเบรนให้ผลดีในการควบคุม THMs ในแหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ต่อจากนั้นได้มีการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน Thierry Boulance et al. (1999) รายงานว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์ 3 ชนิดคือ เฟอร์ริกคลอไรด์, อลูมิเนียมซัลเฟต และ อลูมิเนียมโพลีคลอโรซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชัน ขึ้นกับค่า พีเอช โดย เฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 5.5 และพีเอช 7.0 สำหรับสาร โคแอกกูแลนต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ

MULFORD ET AL. (1999) ทำการวิจัยเพื่อศึกษาว่าผลของการดำเนินระบบ NF ในระดับ PILOT PLANT จะสามารถแสดงถึงผลของการดำเนินระบบ NF ในระดับ FULL-SCALE ได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยจากการทดลองพบว่าอัตราการผลิต และคุณภาพน้ำที่ผลิตได้จากโรงผลิตน้ำจริง ถูกจำลองโดยการดำเนินระบบ PILOT PLANT ในช่วงเวลา 4 เดือนของการทดลองอย่างถูกต้อง จากผลการทดลองพบว่า น้ำที่ผลิตได้มีค่า TOC 0.4 MG/L THMFP 35  $\mu$ G/L และ HAAFP 28  $\mu$ G/L

Herremans et al. (1997) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration ; MF) ชนิด Polypropylene hollow fiber ซึ่งมีขนาดช่องว่าง 0.2 ไมโครเมตร พื้นที่การกรอง 420 ตร.ม. โดยใช้น้ำใต้ดินจากบริเวณหินปูนที่มีลำธารใต้ดิน คือ Berray-Quest ใน Normandy ประเทศฝรั่งเศส ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ระบบ MF มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคและคอลลอยด์ ซึ่งวัดโดยความขุ่น เหล็ก และแมงกานีส รวมทั้งแบคทีเรีย สำหรับสารอินทรีย์กำจัดได้เฉพาะที่ไม่ละลายน้ำ

Adham et al. (1996) รายงานจากการสำรวจระบบผลิตน้ำด้วย MF และ UF 74 แห่ง พบว่าระบบผลิตส่วนใหญ่ใช้เมมเบรนชนิด Polymeric ใช้แหล่งน้ำดิบจากน้ำใต้ดิน 35% และใช้น้ำผิวดิน 65% โดยที่คุณสมบัติของแหล่งน้ำดิบจะมีค่าความขุ่นตั้งแต่ 1-100 NTU ปริมาณ TOC 1-2 mg/l ซึ่งระบบสามารถกำจัดความขุ่นเหลือเพียง 0.1 NTU และกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ถึง 100% แต่กำจัด TOC ได้น้อยกว่า 20% และในการทำความสะอาดเมมเบรนของ MF ด้วยสารเคมีโดยเฉลี่ยจะทำประมาณ 6 ครั้งต่อปี ซึ่งมีการคำนวณค่าใช้จ่ายของระบบ MF ได้ประมาณ 0.13-0.66 เหรียญสหรัฐต่อลบ.ม.

### ตารางที่ 6 แสดงคุณภาพน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกรองแล้วในฤดูฝน

Parameter	Unit	Sampling Date			
		Dec.21 , 93		Jan.27 , 94	
		Raw water	Treated water	Raw water	Treated water
Turbidity	NTU	32.0	0.3	7	<0.1
Total Fe	µg/ml	8920	<20	115	<20
Total Mn	µg/ml	410	<10	<10	<10
Organic matter	mgO <sub>2</sub> /L	12.8	3.3	1.1	0.9
Total coliforms	No./100ml	126000	0	1300	0

ที่มา : Herremans et al. (1997)

Schneider et al. (2001) ได้มีการนำเมมเบรนมาใช้บำบัดน้ำจากการล้างยอนของระบบกรอง โดยใช้ระบบไมโครฟิลเตรชัน เมมเบรนชนิด Hollow fiber membrane ขนาด 0.2 และ 0.1 µm ชนิดกรองจากด้านนอกเข้าสู่ด้านใน และคุณสมบัติของน้ำล้างยอนมีความขุ่นเฉลี่ย 2.0 NTU ปริมาณเหล็กเฉลี่ย 0.02 มก./ล. ปริมาณแมงกานีสเฉลี่ย 0.23 มก./ล. และสีเฉลี่ย 35 SCU จากการใช้ Hollow fiber membrane ของ Zenon ขนาด 0.1 µm พื้นที่หน้าตัด 56 ตร.ม. ทำการทดลองที่อัตราการกรอง 60 ลิตร/ตร.ม.-ชม. และสูญเสียความดันเพียง 2 นิ้ว Hg โดยมีการทำการล้างยอนเมมเบรนเป็นเวลา 15 วินาที ทุก ๆ 10 นาที และระบบสามารถทำงานได้นานถึง 4 เดือน

Parker et al. (2001) รายงานว่าในการทำการทดลองขนาด Pilot plant โดยใช้อัตราการกรองคงที่ 0.756 ลิตร/วินาที ทำให้ Transmembrane pressure เพิ่มขึ้นจนถึง 12 psi แล้วทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีทุก ๆ 3 หรือ 4 สัปดาห์ ความขุ่นก่อนผ่านเมมเบรน 12.4 ถึง 88 NTU หลังออกเมมเบรนเหลือ 0.013 ถึง 0.055 NTU และกำจัด TOC ได้ 13.6%

Karimi et al. (1999) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ MF ในการบำบัดน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ Hollywood พบว่าค่าฟลักซ์ การค้นพบนี้มีนัยสำคัญเพราะว่ามีแนวโน้มที่จะใช้ค่า

ฟลักซ์ 114 ลิตร/ตร.ม.-ชม. ในแคลิฟอร์เนีย ค่า TOC ถูกกำจัดได้ 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้ ค่าฟลักซ์ ที่ทำการทดสอบ การเติม 3 mg/l ของเฟอร์ริกคลอไรด์จะช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็น 22 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการ MF ลด UV<sub>254</sub> ได้เฉลี่ย 60 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ ระหว่าง TOC และ UV<sub>254</sub> ยังไม่ถูกกำหนดอย่างชัดเจน และ THMs ไม่ถูกกำจัดในระบบนี้

Wiesner et al. (1991) ทำการศึกษาโดยใช้ Tubular Ceramic membrane พบว่าค่าความขุ่น ของน้ำหลังผ่านเมมเบรน แปรผันกับขนาดช่องว่างของเมมเบรน ความขุ่นของน้ำดิบที่ใช้เท่ากับ 25 NTU เมมเบรน MF ขนาดช่องว่าง 0.05, 0.2 และ 0.8 จะลดความขุ่นได้เป็น 0.4, 0.9 และ 0.8 NTU ตามลำดับ และจากการศึกษาถึงการบำบัดขั้นต้นด้วยสาร โคแอกกูแลนต์ พบว่าช่วยลด ความขุ่นได้มากขึ้น

นลินี (2544) ศึกษาการใช้เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน ในการผลิตน้ำประปาพบว่า สามารถ ผลิตน้ำประปาได้ตามมาตรฐานการประปานครหลวง โดยใช้อัตราการกรองสูงสุด 0.3 ลบ.ม./ตร. ม.-วัน ที่ความดันสูงสุด 23 kPa และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำด้านต่างๆ พบว่าสามารถกำจัดความขุ่นได้สูงมากเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ กำจัดสีได้ประมาณ 70-95 เปอร์เซ็นต์ กำจัดค่า UV<sub>254</sub> ได้ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ กำจัดค่า TOC ได้ประมาณ 5-30 เปอร์เซ็นต์ และ พบว่าการบำบัดน้ำขั้นต้นด้วยกระบวนการ โคแอกกูเลชันจะช่วยลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้า เยื่อกรองได้มากสังเกตได้จากค่าความดันที่ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเดินระบบระยะยาว

ทิพย์สุรีย์ (2546) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของการกรองผ่านเมมเบรนชนิดไมโคร ฟิลเตรชันในการกำจัดอนุภาคออกจากน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น พบว่าระบบการ กรองผ่านเมม เบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดความขุ่นให้เหลือความขุ่นเฉลี่ยออกมาประมาณ 0.26-0.94 NTU ประสิทธิภาพ การกำจัดมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มของความขุ่นเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ลดลง ขนาดอนุภาคประมาณ 28.94-98.84 ไมครอน โดยการใช้สารสร้าง ตะกอนในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ได้ขนาดของกลุ่มตะกอนที่ใหญ่ขึ้นและส่งผลให้การหลุดรอด ของอนุภาคขนาดเล็กผ่านเยื่อกรองลดลง รวมถึงลดการอุดตันของเยื่อกรองภายในรูพรุนของเยื่อ กรอง ซึ่งส่งผลให้แรงดันสูญเสียผ่านเยื่อกรองไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีความดันสูญเสียผ่านเมม เบรน 14.86 kPa เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง

สุนิสา (2546) ได้ศึกษาสภาพการทำงานและประสิทธิภาพของการกรองผ่านเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน โดยมีขั้นตอน การกรองตรงผ่านตัวกลางเม็ดพลาสติก โพลีโพรพิลีน ก่อนผ่านเข้าสู่เมมเบรนและใช้สารสร้างตะกอนคือ Alum , FeCl<sub>3</sub> , PACl และ Alum/Lime/Polymer ซึ่งในการเดินระบบ 7 ชม. พบว่าในทุกอัตราการกรองผ่านเมมเบรน สามารถกำจัดความขุ่น สี ความนำไฟฟ้า TOC เหล็ก และแมงกานีสได้ใกล้เคียงกัน แต่ต่างกันที่ค่าความดันผ่านเมมเบรน โดยที่อัตราการกรอง 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน ความดันมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่อัตราการกรอง 1.0 และ 1.4 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน ความดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ ยกเว้นกรณีน้ำดิบความขุ่นสูงที่อัตราการกรองชั้นพลาสติกถลอย 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ความขุ่นของน้ำในถัง Reactor มีค่าต่ำ จึงมีผลทำให้ที่อัตราการกรองผ่านเมมเบรน 1.0 และ 1.4 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน ความดันมีค่าต่ำและคงที่แต่อย่างไรก็ตามความดันยังคงมีค่าสูงกว่าที่อัตราการกรอง 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน

สมศักดิ์ (2548) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของระบบชั้นกรองตัวกลางเม็ดพลาสติกถลอยร่วมกับเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้สารสร้างตะกอนคือ FeCl<sub>3</sub> และ PACl พบว่าโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และ เฟอร์ริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูป UV<sub>254</sub> ได้ร้อยละ 74.26 และ 69.06 ในรูป TOC ได้ร้อยละ 52.90 และ 48.18 ตามลำดับ เมื่อนำมาทดลองในระบบทดลองต้นแบบโดยกรองผ่านชั้นกรองเม็ดพลาสติกถลอยที่อัตราการกรอง 7.5 , 11 และ 15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และใช้สารสร้างตะกอนในอัตรา 20 , 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอัตราการกรองที่ 11 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.และใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ ในอัตรา 100 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ดีที่สุด เมื่อนำชั้นกรองตัวกลางเม็ดพลาสติกถลอยมาทดลองร่วมกับเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน ที่อัตราการกรอง 0.30, 0.45 และ 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน อัตราการกรองของเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันที่เหมาะสมเท่ากับ 0.45 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน และระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูป UV<sub>254</sub> ได้ร้อยละ 77.19 และในรูป TOC ได้ร้อยละ 59.70 และกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 99.25 การศึกษาหาสาเหตุของการอุดตันของเมมเบรนพบว่ามีสาเหตุมาจากทั้งความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งวิธีการทำความสะอาดชั้นกรองเม็ดพลาสติกถลอยที่เหมาะสมคือ ล้างด้วยอากาศ 3 นาทีตามด้วยน้ำ 2 นาที จำนวน 2 รอบ และการล้างเมมเบรนด้วยการฟลัม ให้เกิดฟองอากาศและล้างด้วยน้ำสะอาดเป็นเวลา 4 นาที เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ

กมลรัตน์ (2539) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงาน เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของผงถ่านกัมมันต์ ที่มีต่อระบบ แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ผงถ่าน กัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบได้อย่างชัดเจน และจากการศึกษา เปรียบเทียบผลการกำจัดสีโดยใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 4 ค่าเป็นตัวดูดซับ โดยวจน์ศิริ (2539) พบว่าผลจากฟรอนดิชไอโซเทอร์มแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ขนาดรูพรุนใหญ่ สดให้ผลดีที่สุดในการกำจัดสี

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด

Oxenford and Lykins (1991) ได้รายงานว่าการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดเป็นเทคโนโลยี ที่เหมาะสมที่สุดขณะนี้ในการกำจัดสารอินทรีย์ และจากการศึกษาของ Adam and Clark (1991) ซึ่ง ทำการประเมินราคาทั้งในด้านการก่อสร้าง วิธีการเดินระบบทางด้านเวลาสัมพัทธ์ และวิธีการใช้ ถ่านกัมมันต์ สรุปว่าในการกำจัดสารอินทรีย์ทั่วไปควรใช้เวลาสัมพัทธ์ประมาณ 10 – 20 นาที ส่วน สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับควรใช้เวลาสัมพัทธ์นานขึ้นตัวอย่างเช่น 30 – 40 นาที Mc Guire *et al.* (1991) ทำการศึกษาการกำจัดไตรฮาโลมีเทนด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด โดยใช้ชุดการทดลองระบบ กรองน้ำแบบดูดซับผิวด้วยถ่านกัมมันต์ในระดับระบบขนาดต้นแบบ พบว่า สามารถลดความเข้มข้น ของไตรฮาโลมีเทนได้เท่ากับ 10  $\mu\text{g/l}$  โดยน้ำที่ยังไม่ได้บำบัดมีความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทน ประมาณ 60-80  $\mu\text{g/l}$

ส่วนระบบการผลิตน้ำประปาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นกรใช้ระบบที่เกี่ยวข้อง กับกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการกรอง โดยการรวมตัวของตะกอนจะเกิดขึ้น ในช่วงที่กลุ่มตะกอนเล็ก ๆ สัมผัสกับตัวกลางเม็ดพลาสติก ซึ่งชั้นกรองตัวกลางจะช่วยเพิ่มอัตราการ สัมผัสและบังคับให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันและทำให้เกิดการชนกันและจับตัวกัน เป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ถูกกักเก็บไว้ภายในช่องว่างชั้นกรองตัวกลางเม็ดพลาสติก หลังจากนั้น อนุภาคที่สามารถผ่านชั้นกรองมาได้ถูกการดูดซับผิวด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด อีกส่วนหนึ่งแยกผ่านชั้นกรองตัวกลางฟองน้ำ