



บทที่ 2

ทฤษฎีบท

ถ่านปลุกฤทธิ์ (Activated Carbon) เป็นสารคาร์บอนชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยกลุ่มของสารชนิดต่างๆ ซึ่งไม่มีสูตรโครงสร้างแน่นอน ไม่สามารถแยกให้เห็นชัดโดยการวิเคราะห์ทางเคมี แต่มีข้อแตกต่างกัน คือ คุณสมบัติการดูดซับ

2.1 กระบวนการเตรียมถ่านปลุกฤทธิ์

วัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอน (Carbonaceous Material) ส่วนใหญ่สามารถนำมาเตรียมเป็นถ่านปลุกฤทธิ์ได้ เช่น กระจุกไม้ ถ่านหิน น้ำตาล เป็นต้น แต่มีพลังการดูดซับและการใช้ประโยชน์เฉพาะตัว เช่น กะลามะพร้าวให้ถ่านที่มีเนื้อแข็งและมีความหนาแน่น เหมาะสำหรับดูดซับพวกไฮโดรคาร์บอน ส่วนกระจุกประกอบด้วยแร่ธาตุบางอย่างเหมาะสำหรับฟอกน้ำตาลให้บริสุทธิ์

วิธีเตรียมถ่านปลุกฤทธิ์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และกระตุ้นปลุกฤทธิ์ (Activation)

2.1.1 การคาร์บอนไนเซชัน

เป็นขั้นตอนการเผาวัตถุดิบในที่ไม่มีอากาศ เพื่อไล่ธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน และไฮโดรเจน ออกจากวัตถุดิบ มีอุณหภูมิการเผาไม่แน่นอน เช่น การเตรียมถ่านแอนทราไซต์ เผาที่อุณหภูมิ 850°C - 900°C ในไอน้ำได้ถ่านมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก ในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันอาจใส่สารเคมีเหมาะสม เผารวมกับวัตถุดิบด้วย เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ สารเคมีที่ใช้ได้แก่

แมกนีเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ เป็นต้น ในอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่ใช้ซิงค์คลอไรด์ เนื่องจากเป็นสารที่สามารถละลายทั้งเซลลูโลส และองค์ประกอบ อื่นๆในวัตถุคิบบได้ง่าย

### 2.1.2 การปลุกฤทธิ์

ถ่านที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะการคาร์บอนในเซชันที่เหมาะสมสามารถนำไป ใช้ประโยชน์บางอย่างได้ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการต่อไป แต่บางครั้งจำเป็นต้องนำถ่าน ไปผ่านไประบวนการรมวิธีการปลุกฤทธิ์ ( Activation ) เพื่อเพิ่มพลังการดูดซับให้ถ่าน โดย การทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิไดซิงหรือสารเคมี การปลุกฤทธิ์โดยวิธีออกซิเคชัน ทำให้ถ่าน มีพลังการดูดซับขึ้นกับองค์ประกอบ คือ

1. ชนิดและความเข้มข้นของก๊าซออกซิไดซิง
  2. อุณหภูมิของปฏิกิริยา
  3. ปริมาณและชนิดขององค์ประกอบเกลือแร่ในถ่าน
  4. ปริมาณและชนิดของสารอนินทรีย์ที่เติมลงไปในช่วงที่มีการออกซิเคชัน
- เพื่อเป็นแคตตาลิสต์ หรือเป็นสารปลุกฤทธิ์

#### ก. การปลุกฤทธิ์ด้วยก๊าซออกซิไดซิง

ก๊าซที่ใช้ในการปลุกฤทธิ์ ได้แก่ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และ ออกซิเจน สภาวะที่เหมาะสมในการออกซิเคชัน ใช้ได้เฉพาะ สำหรับแต่ละสถานการณ์ ส่วน ใหญ่ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีการเตรียมถ่าน เช่น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการออกซิเค- ชันถ่านที่เตรียมด้วยซิงค์คลอไรด์ จะไม่เหมือนกับถ่านที่เตรียมด้วยไม้กอล์ฟคาไล อุณหภูมิ การปลุกฤทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับก๊าซออกซิไดซิงแต่ละชนิด และชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดง ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิที่เหมาะสม และชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูก  
ฤทธิ์สำหรับก๊าซชนิดต่างๆ (4)

ชนิดของก๊าซ	อุณหภูมิ ( °C )	ชนิดของปฏิกิริยา
คาร์บอนไดออกไซด์	850 - 1100	ดูดความร้อน
อากาศ	ต่ำกว่า 600	คายความร้อน
ไอน้ำ	750 - 950	ดูดความร้อน

การปลูกฤทธิ์ด้วยไอน้ำ จะได้งานปลูกฤทธิ์ที่มีพลังการดูดซับสูงกว่าเมื่อใช้คาร์บอน  
ไดออกไซด์ และอากาศ (3) อุณหภูมิในการปลูกฤทธิ์ด้วยไอน้ำไม่ควรเกิน 1,000 °C  
เพราะทำให้พลังการดูดซับลดลง การปลูกฤทธิ์ด้วยอากาศไม่นิยมใช้กัน เนื่องจากเป็นปฏิกิริยา  
คายความร้อนซึ่งมีความยุ่งยากในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่

#### ข. การปลูกฤทธิ์ด้วยสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการปลูกฤทธิ์ (3) ได้แก่ พวกซิลิเกต กรดฟอสฟอริก กรด  
ไนตริก พวกคาร์บอนเนต โคโลไมท์และซิงค์คลอไรด์ เป็นต้น ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติการ  
ดูดซับของถ่านปลูกฤทธิ์ที่เตรียมได้ คือ อัตราส่วนน้ำหนักของสารเคมีต่อน้ำหนักของ  
วัสดุตั้งต้น สารเคมีที่ใช้ปลูกฤทธิ์ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติในการกักกร่อนสูงที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น  
ภาชนะที่ใช้เตรียมถ่านปลูกฤทธิ์ควรทำด้วยวัสดุที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี

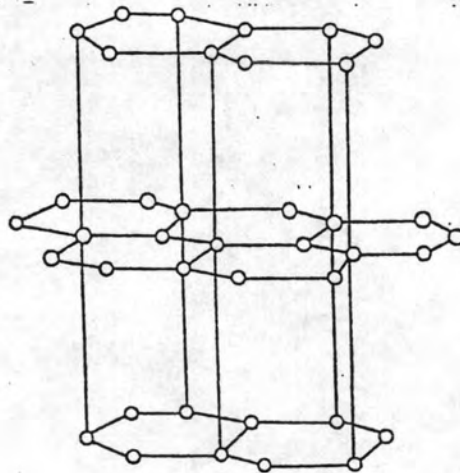
ถ่านปลูกฤทธิ์ทำเป็นผงหรือเม็ดก็ได้ ชนิดที่เป็นผงใช้ในกรณีฟอกสี ของสารละลาย โดยผสมผงถ่านลงในสารละลายที่ต้องการฟอกสี แล้วค่อยกรองเอาผงถ่านออก ส่วน  
ชนิดเม็ดเหมาะสำหรับดูดซับพวกก๊าซ หรือไอและของเหลวที่มีปริมาณมากๆ โดยนิยมให้ถ่าน  
ปลูกฤทธิ์อยู่หนึ่งในภาชนะ แล้วให้ก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านตลอดภาชนะนั้น ถ่านปลูกฤทธิ์ที่ใช้  
ควรมีกำลังวัตถุเชิงกล (Mechanical Strength) สูงเพียงพอที่จะทนต่อการสีกกร่อนเมื่อ

ใช้ติดต่อกัน มีความหนาแน่นและพลังการดูดซับสูง เพื่อประยุกต์สำหรับวางเครื่องดูดซับ

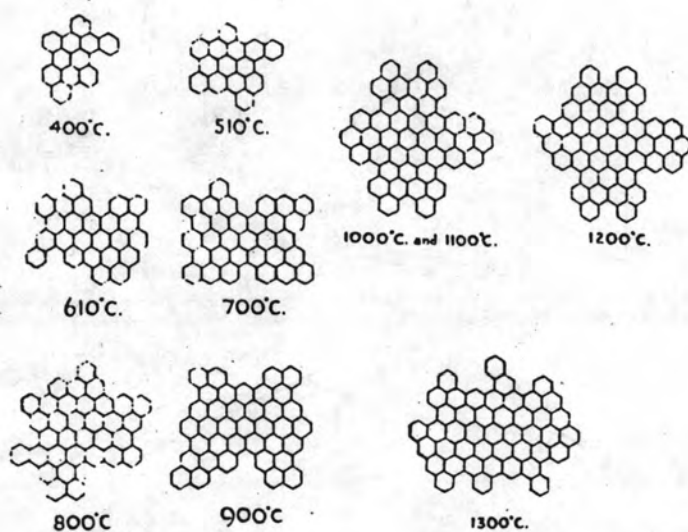
กะลุมะพร้าว เป็นวัตถุดิบเหมาะสำหรับการดูดซับพวกก๊าซ ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันกะลุมะพร้าวจะแตกตัว ให้โครงสร้างรูพรุนที่แข็ง มีความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูง จึงเหมาะทำเป็นถ่านปลุกฤทธิ์ชนิดเม็ด ( Granular Activated Carbon )

## 2.2 ทฤษฎีการปลุกฤทธิ์

ถ่านปลุกฤทธิ์มีโครงสร้างเป็นผลึกเล็กๆ ประกอบด้วยแผ่นแบนราบเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นรูปหกเหลี่ยมกันเท่าๆ กัน แต่ละอะตอมยกเว้นอะตอมที่มุมจับกับอะตอมคาร์บอนอื่น 3 อะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ ( Covalent Linkages ) มีลักษณะคล้ายผลึกกราไฟท์ แต่การจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ลักษณะของผลึกกราไฟท์แสดงในรูปที่ 2.1



ขนาดของผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน และบางครั้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ ในการเตรียมถ่านจากพวกเซลลูโลส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความสูงของชั้นผลึกจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนถึงอุณหภูมิ 1,300°ซ แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละชั้นของผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆจนถึงอุณหภูมิ 700°ซ แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในระนาบชั้นเดียวของผลึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



### 2.2.1 ปฏิกิริยาของก๊าซออกซิโคซิงในการปลุกฤทธิ์

เมื่อนำถ่านที่ได้จากการเผาโดยวิธีธรรมดา มาปลุกฤทธิ์ด้วยก๊าซออกซิโคซิง การปลุกฤทธิ์เกิดขึ้น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเผาไหม้พวกน้ำมันดิบและคาร์บอนอสัณฐานที่ปิดกั้นรูพรุนระหว่างผลึกไว้ ขั้นที่สอง ธาตุคาร์บอนในผลึกถูกเผาไหม้โดยทำปฏิกิริยากับก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่อยู่ตรงมุมและขอบผลึก และอะตอมคาร์บอนในชั้นผลึกส่วนที่ถูกเผาไหม้ จะมีความไวในการทำปฏิกิริยากับก๊าซมากกว่าตำแหน่งอื่น เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวชั่วคราวตรงตำแหน่งที่ทำปฏิกิริยา แล้วสลายให้ออกไซด์ของคาร์บอนเป็นก๊าซหลุดจากผิว ผนังที่อะตอมคาร์บอนเพิ่งหลุดไปเกิดอะตอมคาร์บอนที่มีความไวต่อปฏิกิริยาใหม่ และพร้อมจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิโคซิง หรือถูกซับสารอื่นต่อไป ดังนั้นที่สภาวะการปลุกฤทธิ์ที่เหมาะสม ก๊าซออกซิโคซิงจะเลือกกัดกร่อนบนผิวถ่านเฉพาะแห่ง เกิดเป็นรูพรุน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น

### 2.2 2 ปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและการปลุกฤทธิ์

ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน สารอินทรีย์ที่เค็มลงไปจะเป็นโครงสร้างให้อะตอมคาร์บอนที่เพิ่งเกิดใหม่จากการสลายของสารตั้งต้นเกาะด้วยแรงดูดซับ (Adsorption Forces) ต่อมาเมื่อล้างสารอินทรีย์เหล่านี้ออกด้วยน้ำหรือกรด ผิวคาร์บอนจะมีอิสระจับหรือดูดซับสารอื่นได้ ดังนั้นถ่านที่ได้เมื่อล้างเอาสารอินทรีย์เหล่านี้ออกหมดแล้ว จะสามารถดูดซับสารอื่นได้ดี ถ้าสารอินทรีย์นั้นเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดน้ำ เช่น ซิงค์คลอไรด์จะทำให้ให้ออกซิเจน และไฮโดรเจนในสารตั้งต้นถูกแยกออกมาเป็นน้ำมากกว่าเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenated Organic Compound) การคาร์บอนไนเซชันที่เค็มสารเคมีชนิดนี้เปอร์เซ็นต์ของถ่านที่ได้จะเพิ่มขึ้น

ในกระบวนการปลุกฤทธิ์ สารอนินทรีย์จำนวนมากที่มีอิทธิพลเฉพาะตัวในระหว่าง การออกซิเดชันด้วยไอน้ำหรืออากาศ สารอนินทรีย์บางชนิดมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการปลุกฤทธิ์ เช่น คาร์บอนที่มีโปแตสเซียมคาร์บอนเนตอยู่จะเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำลง แต่กราคอร์โซฟอส ฟอริคจะเพิ่มจุดคิกไฟของคาร์บอนให้สูงขึ้น และบางชนิดมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการดูดซับ เช่น ในกรณีที่อะตอมที่ไม่ใช่คาร์บอนจากสารอนินทรีย์ เมื่อถูกจับหรือดูดซับบนพื้นผิวบางแห่งของถ่าน แล้ว และไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำหรือกรด เมื่อนำถ่านไปปลุกฤทธิ์ จะเกิดการออกซิเดชันที่พื้นชะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ ได้ถ่านปลุกฤทธิ์ ที่มีคุณสมบัติการดูดซับเฉพาะตัว ตัวอย่างการเตรียมถ่านปลุกฤทธิ์แอนทราไซท์ ในกรณีที่ไม่ได้ผสมสารอนินทรีย์ในขั้นตอนการเผา ก่อนนำไปปลุกฤทธิ์ด้วยไอน้ำ ถ่านปลุกฤทธิ์ที่ได้ไม่มีคุณสมบัติในการฟอกสี แต่เมื่อผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมซัลเฟตในถ่านแอนทราไซท์ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า  $910^{\circ}\text{C}$  จะทำให้สารเคมีจับกับอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะที่แข็งแรงไม่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำหรือกรด เมื่อนำไปปลุกฤทธิ์ด้วยไอน้ำจะได้ถ่านปลุกฤทธิ์ที่มีคุณสมบัติในการฟอกสีสูง

นอกจากนี้ ธาตุที่ไม่ใช่อะตอมคาร์บอนบางตัว เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน จะกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างโมเลกุลในถ่านปลุกฤทธิ์ โดยที่ธาตุเหล่านี้จับกับอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะที่แข็งแรงและให้พันธะการดูดซับ (Adsorptive bond) หลักฐานที่สนับสนุน คือ ถ่านปลุกฤทธิ์ที่มีพลังการดูดซับเฉพาะตัว จะมีอะตอมออกซิเจน เหล็ก หรือไนโตรเจนอยู่ด้วย และพลังการดูดซับอะตอมเหล่านี้สามารถส่งผ่านอะตอมคาร์บอนที่อยู่ติดกันได้

### 2.3 ทฤษฎีการดูดซับ

เมื่อมีสารสองชนิดมาสัมผัสกัน ปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมของสารกระทำกันที่ผิวสัมผัส ทำให้โมเลกุลหรืออะตอมมีความเข้มข้นเฉพาะบริเวณระหว่างผิวสัมผัสนั้น



เรียกว่า การดูดซับ ( Adsorption ) ปกติแล้วการดูดซับมักเกิดขึ้นเมื่อสารใดสารหนึ่ง เป็นของแข็ง พิจารณาระบบที่ประกอบด้วยก๊าซและของแข็ง ของแข็งที่สามารถดูดซับอะตอม หรือโมเลกุลของก๊าซได้เรียกว่า สารดูดซับ ( Adsorbent ) และเรียกก๊าซว่า ตัวถูกดูดซับ ( Adsorbate ) เมื่อโมเลกุลก๊าซที่ถูกดูดซับไว้ หลุดออกจากผิวของสารดูดซับเข้าสู่ ก๊าซหรือของเหลว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การคายการดูดซับ ( Desorption ) การดูดซับบนผิวของแข็งเกิดขึ้นได้ทั้งภายใต้สภาวะนิ่ง ( Static Condition ) คือ ตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับอยู่นิ่ง และภายใต้สภาวะเคลื่อนที่ ( Dynamic Condition ) คือตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน

### 2.3.1 แรงการดูดซับ

การดูดซับแบ่งเป็นสองชนิดคือ การดูดซับทางเคมี ( Chemisorption ) และการดูดซับทางฟิสิกส์ ( Physical Adsorption ) ความแตกต่างของการดูดซับทั้งสองวิธีอยู่ที่แรงการดูดซับ

การดูดซับทางฟิสิกส์ เกิดเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจับบนผิวของแข็งด้วยแรงค่อนข้างอ่อน เป็นแรงชนิดเดียวกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ( Van der Waals Forces ) เมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โมเลกุลที่ถูกดูดซับยังมีคุณสมบัติของเคมีเหมือนเดิม การดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้น คือ แต่ละชั้นโมเลกุลจะเกิดบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ก่อนแล้ว

การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวของสารดูดซับมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกัน หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน พันธะที่เกิดขึ้นจึงเป็นพันธะทางเคมี การดูดซับโดยวิธีนี้จะแรงกว่าการดูดซับทางฟิสิกส์ บางครั้งการดูดซับต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วยเรียกว่า Activated Adsorption ชั้นการดูดซับทางเคมี

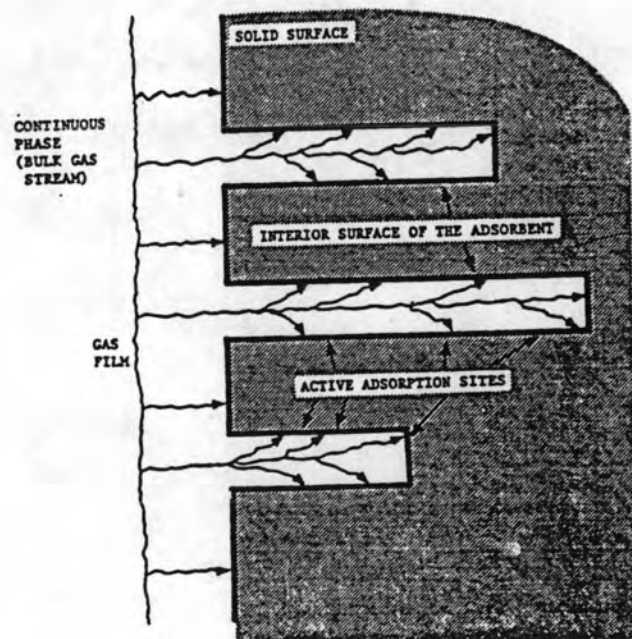
หนาเพียงโมเลกุลเดียว เพราะโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับต้องสัมผัสกันโดยตรง และเกิดการถ่ายเทหรือให้อิเล็กตรอนร่วมกัน ตัวอย่างการดูดซับออกซิเจนบนถ่านปลุกฤทธิ์ ที่ช่วงอุณหภูมิจากประมาณ  $1000^{\circ}\text{C}$  ถึงต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  ออกซิเจนจะถูกดูดซับบนถ่านปลุกฤทธิ์โดยวิธีเคมี แต่ที่อุณหภูมิ  $-200^{\circ}\text{C}$  การดูดซับทางเคมีจะลดลง ส่วนใหญ่เป็นการดูดซับทางฟิสิกส์

### ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางฟิสิกส์และทางเคมี

1. ขนาดความร้อนของการดูดซับ ( Heat of Adsorption ) เมื่อก๊าซถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับจะมีความร้อนถูกปล่อยออกมา ถ้าเป็นการดูดซับแบบฟิสิกส์ จะมีขนาดพอกับความร้อนที่ปล่อยออกมาในการกลั่นตัวจากก๊าซเป็นของเหลว ประมาณกิโลแคลอรีต่อโมล ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีความร้อนของการดูดซับประมาณ  $10^4 - 10^5$  แคลอรีต่อโมล
2. อุณหภูมิการดูดซับ การดูดซับทางฟิสิกส์เกิดภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำที่ เหมาะสมในระบบก๊าซ - ของแข็ง ขณะที่การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อก๊าซสามารถเกิดพันธะเคมีกับผิว
3. โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางฟิสิกส์ สามารถทำให้หลุดจากผิวของสารดูดซับได้ ด้วยวิธีลดความดันที่อุณหภูมิเกี่ยวกับการเกิดการดูดซับ โดยโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลง การขจัดชั้น โมเลกุลที่ถูกดูดซับโดยวิธีเคมีทำได้ยาก
4. จำนวนชั้นที่ถูกดูดซับ การดูดซับทางฟิสิกส์สามารถเกิดขึ้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวซ้อนกันได้หลายชั้น แต่การดูดซับทางเคมีมักเกิดโมเลกุลที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียวบางกรณีการดูดซับทางฟิสิกส์ อาจเกิดบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมี
5. พลังงานเร่ง ( Activating Energy ) การดูดซับทางฟิสิกส์เกิดได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานช่วยเร่ง การดูดซับทางเคมีอาจเกิดได้ทันทีโดยทั่วไปแต่ต้องอาศัยพลังงานเร่ง

## 2.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับ ( Kinetics of Adsorption )

เมื่อสารดูดซับสัมผัสกับก๊าซหรือไอ จำนวนโมเลกุลของก๊าซจะลดลง อัตราที่จำนวนโมเลกุลของก๊าซลดลงขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่วิ่งมาชนบนผิวทรงค่าแห่งดูดซับ และอัตราความเร็วของกระบวนการดูดซับก๊าซบนผิว โดยปกติการดูดซับไอระเหยด้วยสารดูดซับ เช่น ถ่านปลุกฤทธิ์จะเป็นการดูดซับทางฟิสิกส์ซึ่งมีอัตราความเร็วของการดูดซับบนผิวสูงมาก ดังนั้นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการลดลงของจำนวนโมเลกุลในก๊าซ หรืออัตราความเร็วของการดูดซับ คืออัตราความเร็วของการเคลื่อนย้ายโมเลกุลก๊าซไปยังตำแหน่งผิวที่สามารถดูดซับได้ ในกรณีสารดูดซับมีโครงสร้างรูพรุนซับซ้อน เช่น ถ่านปลุกฤทธิ์ การเคลื่อนย้ายโมเลกุลก๊าซมายังผิวดูดซับแบ่งเป็น 2 ชั้นตอน คือ โมเลกุลก๊าซเคลื่อนที่มาถึงผิวภายนอกอนุภาคของถ่านปลุกฤทธิ์ก่อน แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปยังผิวภายในรูพรุน ดังรูปภาพที่ 2.5



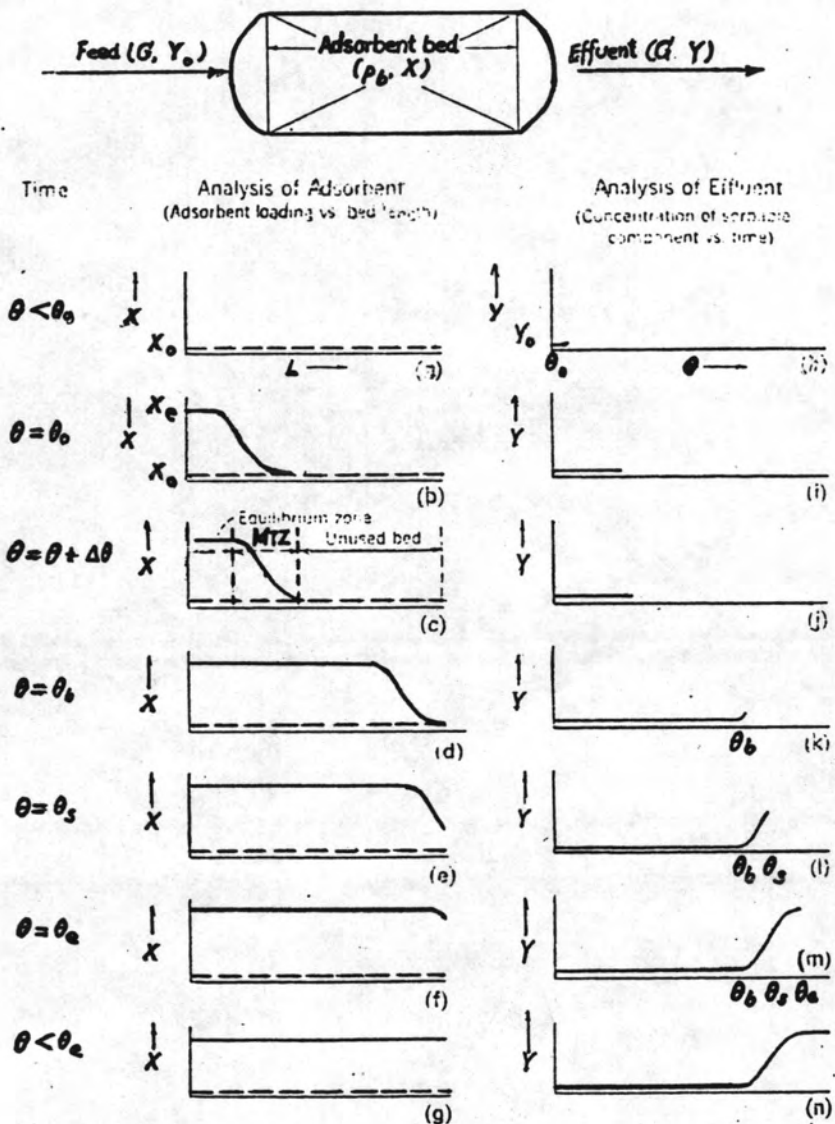
รูปที่ 2.5 กระบวนการดูดซับ

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซมายังผิวภายนอกของอนุภาคของสารดูดซับ ถ้าระบบอยู่ในสภาวะนิ่ง (Static Condition) ความดันก๊าซจะเท่ากันทั้งระบบ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซมายังผิวภายนอกเป็นวิธีการแพร่ธรรมดา (External Diffusion) ถ้าระบบอยู่ในสภาวะเคลื่อนที่ (Dynamic Condition) จะเกิดความดันลดภายในระบบเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ จึงต้องพิจารณาทั้งการแพร่ (External Diffusion) และการไหลโดยวิธีพา (Convection Flow)

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซมายังผิวภายในรูพรุนเป็นกระบวนการแพร่ อาจโดยวิธีแพร่เข้าไปทางรูพรุนหรือทางผิว (Surface migration) หรือโดยแรงแคปิลลารี (Capillary forces) ถ้ารูพรุนมีขนาดกว้างโมเลกุลก๊าซเคลื่อนที่เข้าไปโดยวิธีการพา (Convection flow) และแพร่ธรรมดา แต่ถ้าเป็นรูพรุนที่แคบ โมเลกุลก๊าซจะชนผนังของรูพรุนมากกว่าการชนกันเองระหว่างโมเลกุล โมเลกุลที่ชนบนผิวแล้วสะท้อนกลับสู่ภายนอกอนุภาคน้อยมาก แต่จะแพร่เข้าไปบนผิวภายในของอนุภาคช่วงเวลาหนึ่ง แล้วจึงกลับมาสู่ภายนอกโดยวิธีแพร่ออกจากผิว

## 2.5 ไดนามิกของการดูดซับ (Dynamics of Adsorption)

การนำสารดูดซับไปใช้ในการควบคุมปัญหามลพิษทางอากาศ โดยทั่วไปใช้ระบบการดูดซับทางไดนามิก กล่าวคือ ให้สารดูดซับบรรจุอยู่ในภาชนะหรือคอลัมน์ และอยู่ในลักษณะนิ่งๆ (Fixed Bed) แล้วดูดอากาศหรือไอระเหยให้ไหลผ่านตลอดความลึกของภาชนะที่บรรจุสารดูดซับนั้น พิจารณาคอลัมน์สารดูดซับซึ่งให้ของไหลที่ประกอบด้วยสารถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ไหลเข้าทางด้านบนและไหลออกทางด้านล่างคอลัมน์ด้วยอัตราความเร็วคงที่ ก่อนการใช้งานสารดูดซับทั้งคอลัมน์จะมี



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์การดูดซับของสารดูดซับในคอลัมน์ขณะที่ของไหลซึ่งประกอบด้วยสารที่สามารถถูกดูดซับได้ไหลผ่าน

ความไวต่อการดูดซับสูง เมื่อของไหลไหลผ่านคอลัมน์สารที่สามารถถูกดูดซับได้จะถูกจับ และเกาะติดบนสารดูดซับนั้น ปรากฏการณ์การดูดซับในคอลัมน์นี้ เมื่อการไหลดำเนินติดต่อกันภายใต้สภาวะคงที่สามารถอธิบายได้ด้วยภาพ 2.6

ในภาพ 2.6  $X_0$  เป็นความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับไว้ในคอลัมน์  $X_e$  เป็นความเข้มข้นก่อนใช้งาน  $X_e$  เป็นความเข้มข้นสูงสุด ( ความเข้มข้นอิ่มตัว ) ที่สารดูดซับสามารถดูดซับไว้ได้  $L$  เป็นความยาวของคอลัมน์สารดูดซับ  $Y$  เป็นความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในของไหลที่ไหลออกจากคอลัมน์ เมื่อของไหลไหลผ่านคอลัมน์ช่วงเวลา - หนึ่งหลังจากเวลาเริ่มต้น ตอนต้นของคอลัมน์ซึ่งเป็นทางไหลเข้าของของไหล สารดูดซับจะดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ในของไหลไว้เรื่อยๆจนอิ่มตัว ส่วนของคอลัมน์ที่ถูกดูดซับสารไว้จนอิ่มตัวเรียกว่า เขตสมดุล ( Equilibrium Zone ) ถัดจากเขตสมดุลเป็นช่วงของคอลัมน์ที่ความเข้มข้นสารดูดซับค่อยๆเปลี่ยนแปลงจากความเข้มข้นอิ่มตัว ( $X_e$ ) ไปเป็นความเข้มข้นเดิม ( $X_0$ ) แทนด้วยกราฟเส้นโค้งคล้ายตัว "S" ในรูป 2.6 b ในช่วงนี้สารถูกดูดซับจะเคลื่อนย้ายจากของไหลไปยังผิวดูดซับในสารดูดซับ คอลัมน์สารดูดซับช่วงที่เกิดมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับไว้ เรียกว่า Mass Transfer-Zone ( MTZ ) และกราฟเส้นโค้งที่มีรูปร่างคล้าย "S" นี้ให้นิยามว่า Mass-transfer-wave ขณะที่การไหลดำเนินต่อไป ความยาวของเขตสมดุลจะเพิ่มขึ้นและ Mass-Transfer-Wave จะเคลื่อนที่ผ่านไปทางปลายคอลัมน์ด้วยอัตราความเร็วคงที่ โดยที่ลักษณะของ Mass - Transfer - Wave เหมือนเดิม แต่เคลื่อนที่ทางออกไปจากต้นคอลัมน์มากกว่า ถ้าให้การไหลดำเนินต่อไปอีก จนส่วนนำของคลื่น Mass - Transfer - Wave อยู่ตรงปลายคอลัมน์สารดูดซับพอดี เรียกว่าเกิด Breakthrough แสดงในรูปที่ 2.6 a.

Breakthrough Concentration อาจหมายถึงความเข้มข้นต่ำสุด หรือความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ได้ของสารที่ถูกดูดซับที่ไหลออกจากเครื่องดูดซับ และเวลา

ที่เกิด Breakthrough เรียกว่า Breakthrough Time ใต้แก่  $\theta_b$  ในรูป 2.6 d  
 ถ้าให้ของไหลไหลต่อไปจนส่วนปลายของคลื่น Mass - Transfer - Wave อยู่ที่ปลาย  
 คลื่นพอดี สารถูกขับทั้งคลื่นจะอิมพัลส์สารถูกขับ และอยู่ในสภาวะสมดุลกับความ  
 ความเข้มข้นของสารถูกขับในของไหลที่ไหลเข้าคลื่น เรียกว่าคลื่นอยู่ในสมดุล  
 แสดงในรูป 2.6 f และเวลาที่คลื่นอยู่ในสมดุลเรียกว่า เวลาสมดุล  
 (Equilibrium Time) เมื่อคลื่นอยู่ในสมดุลแล้วจะไม่สามารถถูกขับสารได้อีกต่อไป

เมื่อพิจารณาของไหลที่ไหลออกจากคลื่น ที่เวลาเริ่มต้นของไหลที่ไหลออก  
 จากคลื่นจะประกอบด้วยสารถูกขับมีความเข้มข้นเท่ากับ  $Y_0$  ซึ่งอยู่ในสภาวะสม-  
 ดุลกับความเข้มข้น  $X_0$  จากเวลาเริ่มต้นจนถึง Breakthrough Time  
 ความเข้มข้นของสารถูกขับในของไหลที่ไหลออกจากคลื่นยังคงเท่ากับ  $Y_0$  ตลอด  
 แสดงในรูป 2.6 k ที่เวลา Breakthrough ซึ่งเป็นเวลาที่ส่วนนำของคลื่น Mass-  
 Transfer - Wave มาถึงปลายคลื่น ความเข้มข้นของสารถูกขับในของไหลที่ไหล  
 ออกเริ่มเพิ่มขึ้น และจากเวลา Breakthrough ถึงเวลาสมดุล ( $\theta_b - \theta_e$ )  
 ความเข้มข้นของสารถูกขับในของไหลที่ไหลออกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเท่ากับความเข้มข้น  
 ของสารถูกขับในของไหลที่ไหลเข้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 m และ 2.6 n

ปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการถูกขับทางไดนามิก ความยาวและรูปร่างของ  
 MTZ ใต้แก่

- ก. ชนิดของสารถูกขับ
- ข. ขนาดอนุภาคของสารถูกขับ
- ค. ความลึกของคลื่นของสารถูกขับ

- ง. ความเร็วของก๊าซ
- จ. อุณหภูมิของสารถูกดูดซับ
- ฉ. ความดันของกระแสก๊าซ
- ช. ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ
- ซ. ความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่นในก๊าซรวมทั้งความชื้น
- ด. ความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่นในก๊าซที่อาจรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่หรือทำปฏิกิริยาบนผิวถูกดูดซับ

### ก. ชนิดของสารถูกดูดซับ

มีวัสดุหลายชนิดที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ แอคติเวตเตดเคลย์ ซิลิกาเจล ฟูลเลอร์เอิร์ท แมกนีเซีย ซีโอไลต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีลักษณะเด่นในการนำไปใช้ควบคุมมลพิษทางอากาศมีเพียง 2 ชนิด คือ ถ่านปลุกฤทธิ์ และซีโอไลต์ ถ่านปลุกฤทธิ์ถูกไธระเหยของสารอินทรีย์ได้ดี ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่หนึ่ง ใช้ถ่านไม้ทำเป็นหน้ากากกันก๊าซพิษ Hunter<sup>(5)</sup> ได้ทำการทดลองกับไธระเหยของกรโคอะซีทิด น้ำ เบนซีน เอทิลแอลกอฮอล์ คาร์บอนไดซัลไฟด์ และไธระเหยของสารอินทรีย์อื่น ๆ อีกหลายตัว พบว่าถ่านที่เตรียมจากไม้ต่างชนิดกันจะให้ความสามารถในการดูดซับต่างกัน ซีโอไลต์เป็นแร่ผลึกพวกอลูมิโนซิลิเกต มีคุณสมบัติการดูดซับแตกต่างจากถ่านปลุกฤทธิ์ คือ สามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าตัวทำละลายที่ไม่มีซีโอไลต์สามารถเตรียมให้มีรูพรุนขนาดเฉพาะเพื่อจะเลือกดูดซับเฉพาะโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเท่านั้น

### ข. ขนาดอนุภาคของสารถูกดูดซับ

ขนาดและรูปร่างของอนุภาคมีผลต่อความดันตกในคอลัมน์ของสารถูกดูดซับและ -



อัตราการแพร่ของมวลเข้าไปในรูพรุนของอนุภาค ความดันล้นน้อยที่สุดเมื่ออนุภาคของสารดูดซับมีลักษณะกลมและขนาดสม่ำเสมอ แต่อัตราการแพร่ของมวลมายังผิวภายนอกของอนุภาคเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองส่วนสามของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค และอัตราการดูดซับภายในเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค ความดันล้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วและเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดอนุภาค และพบว่าถ้าให้ปัจจัยอื่นเหมือนกันหมด คออลัมน์ของสารดูดซับที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีกว่าแม้มีความดันล้นมากกว่า

ค. ความลึกของคออลัมน์ของสารดูดซับ

ความลึกของคออลัมน์จะมีผลต่อการดูดซับมวลที่เคลื่อนที่ สิ่งสำคัญคือ คออลัมน์จะต้องลึกกว่าความยาว MTZ โดยทั่วไปควรออกแบบขนาดของคออลัมน์สารดูดซับให้ยาวมากที่สุดเท่าที่ยอมให้ได้โดยพิจารณาจากความดันล้น การคำนวณความลึกของ MTZ อาจคำนวณได้โดยการทดลอง คือ

$$MTZ = \frac{D}{t_2 / (t_2 - t_1) - X}$$

$$D = \text{ความลึกของคออลัมน์}$$

$$t_1 = \text{Breakthrough time}$$

$$t_2 = \text{Equilibrium time}$$

$$X = \text{The degree of saturation in the MTZ}$$

### ง. ความเร็วของก๊าซ

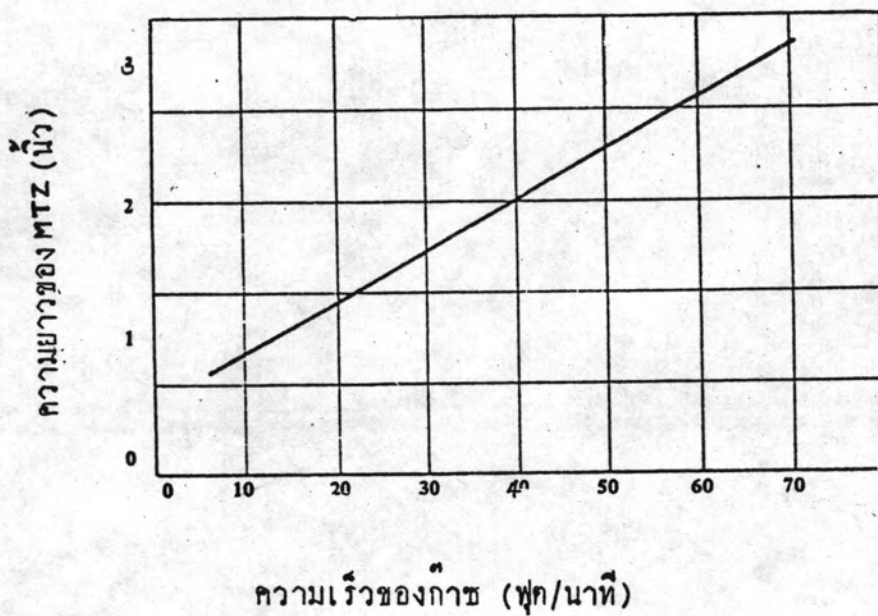
เนื่องจากประสิทธิภาพการจับโมเลกุลในกระแสก๊าซบนผิวตัวดูดซับของสารดูดซับขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัสโดยตรง เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซทำให้เวลาที่กระแสก๊าซสัมผัสกับผิวตัวดูดซับที่ตำแหน่งใดๆ ลดลง ประสิทธิภาพการดูดซับจึงลดลง ดังนั้น กระแสก๊าซจะต้องเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ของสารดูดซับเร็วกว่าเดิม โมเลกุลจึงจะเคลื่อนย้ายจากกระแสก๊าซมายังสารดูดซับได้เท่าเดิม ความยาว MTZ จึงเป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับความเร็วและเป็นส่วนที่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับ ภาพที่ 2.7 แสดงผลของความเร็วของก๊าซต่อความยาวของ MTZ โดยตัวดูดซับเอธานอลบนถ่านปลุกฤทธิ์

### จ. อุณหภูมิของสารดูดซับ

เมื่ออุณหภูมิของสารดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง เนื่องจากโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้มีระดับพลังงานสูงขึ้นจึงพร้อมที่จะกลับเข้าสู่กระแสก๊าซตามเดิม และ MTZ เปลี่ยนแปลงเป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับอุณหภูมิ

การดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ขณะที่การดูดซับเกิดขึ้นไปตามแนวความลึกของคอลัมน์สารดูดซับ อุณหภูมิของสารดูดซับจะสูงขึ้นตามไปในทิศทางเดียวกัน สารดูดซับจะถ่ายเทความร้อนบางส่วนให้แก่ก๊าซที่ไหลผ่าน เมื่อก๊าซไหลผ่านเลยไปจากส่วนที่เกิดการดูดซับ การแลกเปลี่ยนความร้อนจะกลับกัน คือ ก๊าซจะถ่ายเทความร้อนให้แก่สารดูดซับ อุณหภูมิของสารดูดซับจึงเพิ่มขึ้นในระหว่างการเดินเครื่อง ทำให้ความจุการดูดซับของสารดูดซับลดลง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในเครื่องดูดซับสามารถคำนวณได้ โดยตั้งสมมุติฐานว่า อุณหภูมิของกระแสก๊าซที่ไหลออกเท่ากับอุณหภูมิของเครื่องดูดซับ

$$\Delta t = \frac{6.1}{(Sg/c) 10^5 + 0.51(Sa/W)}$$



รูปที่ 2.7 ผลของความเร็วกาซต่อความยาวของ MTZ เมื่อถูกขับเอชานอลบนถ่าน  
ปลุกฤทธิ์

$\Delta t$	=	อุณหภูมิที่เพิ่ม, °F
$W$	=	ความจุ่มตัวของสารที่อุณหภูมิ $t + \Delta t$ , °F
$C$	=	ความเข้มข้นของก๊าซที่ไหลเข้า, ppm
$S_G$	=	ความร้อนจำเพาะของก๊าซ, BTU/ft <sup>3</sup> /°F
$S_a$	=	ความร้อนจำเพาะของสารดูดซับ, BTU/lb/°F
ค่าของ $S_a$		ของสารดูดซับทั่วไปภายใต้สภาวะธรรมดา
		ถ่านปลุกฤทธิ์                      0.25
		อลูมินา                                0.21
		ซีโอไลท์                              0.25

#### ฉ. ความดันของกระแสก๊าซ

ประสิทธิภาพในการดูดซับสารเพิ่มขึ้นเมื่อความดันย่อยของก๊าซเพิ่มขึ้น ในการเพิ่มความดันหรือความหนาแน่นของกระแสก๊าซจะทำให้การเคลื่อนย้ายมวลได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากทำให้ระยะทางโคชนเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างโมเลกุลในก๊าซลดลงเป็นผลให้เพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับได้ในตำแหน่งที่มีความไวบนผิวดูดซับ เมื่อจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับได้ในบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้นโอกาสที่โมเลกุลจะถูกจับมีสูงขึ้น

ข. ความเข้มข้นของสารดูดซับ

ประสิทธิภาพในการดูดซับของสารดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารดูดซับ ความเข้มข้นของสารดูดซับจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับ P/TZ ดังนั้นถ้าให้องค์ประกอบอื่นเหมือนกันหมดการซ้จักสารมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าด้วย ประสิทธิภาพเท่ากันจะต้องใช้คอลัมน์สารดูดซับลึกกว่าเมื่อซ้จักสารชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นสูง สำหรับก๊าซที่ไวไฟ ความเข้มข้นก๊าซที่ต่องการซ้จักต้องต่ำกว่าความเข้มข้นค่าสุคของก๊าซนั้นที่เกิดการระเบิดได้

ค. ความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่นในก๊าซรวมทั้งความชื้น

องค์ประกอบอื่นๆที่ปนอยู่ในกระแสก๊าซจะถูกดูดซับบนสารดูดซับเช่นเดียวกันโดยก๊าซเหล่านี้จะแข่งขันจับบนพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับได้ ดังนั้นจึงทำให้การดูดซับสารที่ต่องการซ้จักลดลง สารดูดซับจะดูออกอากาศเป็นส่วนน้อย แต่ความชื้นจะมีผลต่องการดูดซับมากความสามารถในการดูดซับของถ่านในก๊าซที่มีปริมาณความชื้นสูง จะต่ำกว่าเมื่อดูดซับก๊าซที่แห้ง

ง. ความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่นในก๊าซที่อาจรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหม่หรือทำปฏิกิริยาบนผิวดูดซับ

สารดูดซับบางตัว อาจสลายตัว ทำปฏิกิริยาหรือรวมกันเองเป็นโมเลกุลใหญ่เมื่อสัมผัสบนผิวของสารดูดซับ สารที่ได้หลังจากการสลายตัวแล้วอาจถูกดูดซับได้น้อยลงกว่าสารเดิม ตัวอย่างเช่น ในกระแสอากาศ ในครั้สออกไซด์ จะเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ เมื่อสัมผัสบนถ่านปลุกฤทธิ์ ในกรณีที่มีโมเลกุลรวมกันเป็นโมเลกุลใหญ่บนผิวดูดซับทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับลดลง ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับของอะเซททีเลนบนถ่านปลุกฤทธิ์ที่อุณหภูมิสูงๆ