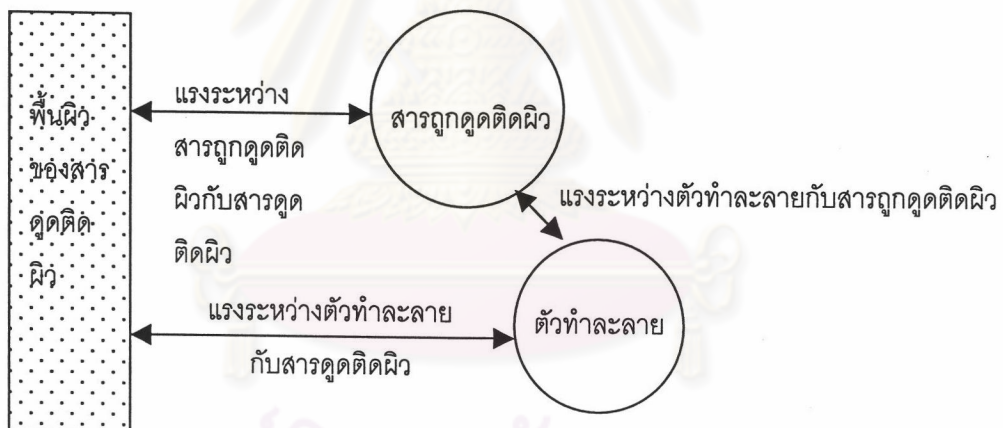


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดติดผิวจากสารละลาย (Adsorption from solution)

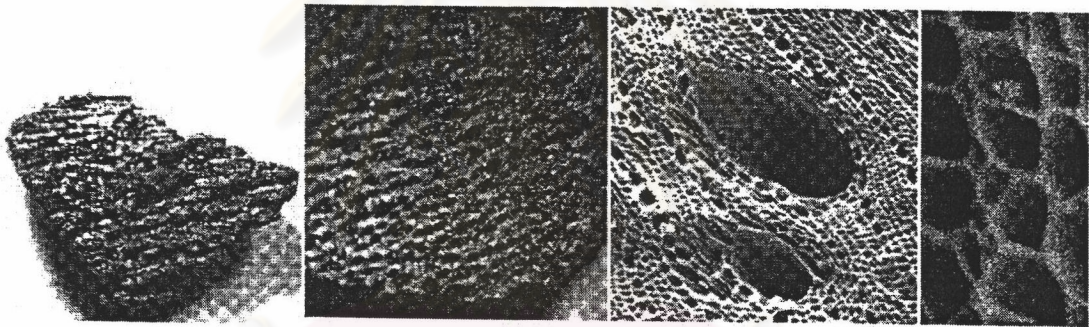
การดูดติดผิวจากสารละลาย เป็นความสามารถของสารดูดติดผิว (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) มาติดบนผิวของมัน ซึ่งจะต้องเอาชนะแรงที่เกิดขึ้นระหว่างตัวทำละลาย (Solvent) และสารถูกดูดติดผิวกับแรงที่เกิดขึ้นระหว่างตัวทำละลายและสารดูดติดผิว ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารดูดติดผิว ตัวทำละลาย และสารถูกดูดติดผิว การดูดติดผิวเกิดจากแรงกายภาพ (Van der Waals Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) ซึ่งเกิดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวกับอะตอมซึ่งเป็นส่วนประกอบที่พื้นผิวของสารดูดติดผิว ดังนั้นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องคำนึงถึงของสารดูดติดผิว ได้แก่ พื้นที่ผิว (Surface Area) และความเป็นขั้ว (Polarity) (Motoyuki, 1990) และคุณสมบัติสำคัญที่ต้องคำนึงถึงของสารถูกดูดติดผิว ได้แก่ ความสามารถในการละลายของสารถูกดูดติดผิวในตัวทำละลาย



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสารดูดติดผิว ตัวทำละลาย และสารถูกดูดติดผิว (Neely และ Isacoff, 1982)

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือพื้นผิวภายในเนื้อถ่านมากเท่าที่ทำได้ จากการศึกษาของ J.C. Abram (1973) พบว่าถ่านกัมมันต์เป็นที่รู้จักกันมานานกว่า 3,000 ปี แต่เริ่มมีการประยุกต์ใช้ในทางการค้าเป็นครั้งแรกในอุตสาหกรรมน้ำตาลเมื่อปี ค.ศ. 1780 และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปี ค.ศ. 1862 ถ่านกัมมันต์ได้ถูกนำมาใช้ทำให้น้ำบริสุทธิ์ขึ้น ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้เริ่มขึ้นในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยได้มีการจดสิทธิบัตรการผลิตถ่านกัมมันต์ไว้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์มี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) โดยเป็นการไล่ความชื้นและเผาวัตถุดิบให้แห้งกลายเป็นถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 200-650 องศาเซลเซียส แต่ถ่านที่ได้จะมีพื้นที่ผิวภายในต่ำ จึงต้องทำต่อในขั้นตอนที่สองคือการออกซิเดชัน (Oxidation) โดยจะเป็นการกระตุ้น (Activation) ด้วยสารเคมีหรือวิธีออกซิโดสโดยใช้สาร เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 750-950 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นผิวภายในอย่างมากมาย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพขยายพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (จากซ้ายไปขวา) (Steve และ Erika, 1998)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากอินทรีย์วัตถุหรือถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุก็ได้ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของอินทรีย์วัตถุและถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้

อินทรีย์วัตถุ ได้แก่

1. เซลลูโลสจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด
2. ถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท (peat) ถ่านบิทูมินัส (bituminous coal)
3. วัตถุดิบจากสัตว์ เช่น กระดูก

ถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุ ได้แก่

1. Hard artificial char เช่น ถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้
2. Soft artificial char เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านหินน้ำมัน

สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้จะขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ สภาวะที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชัน และสภาวะที่ใช้การกระตุ้น จากการศึกษาสมบัติด้านพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ โดย Faust และ Aly (1987) พบว่าถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 300-1,400 ตารางเมตร/กรัม ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Faust และ Aly, 1987)

ถ่านกัมมันต์	วัตถุดิบ	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)
PCC SGL	Bituminous coal	1,000-1,200
PCC BPL	Bituminous coal	1,000-1,200
PCC RB	Bituminous coal	1,200-1,400
PCC GW	Bituminous coal	800-1,000
Columbia CXA/SXA	Coconut Shell	1,100-1,300
Columbia AC	Coconut Shell	1,200-1,400
Columbia G	Coconut Shell	1,100-1,150
Darco S 51	Lignite	500-550
Darco G 60	Lignite	750-800
Darco KB	Wood	950-1,000
Hydro Darco	Lignite	500-600
Nuchar Aqua	Pulp mill residue	550-650
Nuchar C	Pulp mill residue	1,050-1,100
Nuchar (various)	Pulp mill residue	300-1,400
Nurit (various)	Wood	700-1,400

จากการที่ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนและพื้นที่ผิวภายในมากมาย ทำให้มีลักษณะเด่นในการเป็นสารดูดซับที่ดียเยี่ยม จึงได้มีการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยอุตสาหกรรมที่มีการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้กับสารละลายหรือของเหลว (FPRI, 1965) ได้แก่

1. อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้เพื่อฟอกสี และทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
2. อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ใช้เพื่อฟอกสี และการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมัน
3. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสี
4. อุตสาหกรรมเครื่องดื่มและแอลกอฮอล์ ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด
5. อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี
6. อุตสาหกรรมแยกสารที่ต้องการ ใช้ในการแยกของหลังจากสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์
7. กระบวนการเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst carrier) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้น

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่าง ๆ มากมายขึ้นอยู่กับความสะอาดของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ได้แก่ แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น แบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ หรือแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้ แต่สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทางด้านบำบัดน้ำเสีย นิยมแบ่งเป็น 2 ชนิด (มันสิน, 2539) ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 50 ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ซึ่งตะแกรงร่อนเบอร์ 50 นี้มีขนาดของรูเปิด (mesh size) เท่ากับ 0.297 มิลลิเมตร โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์แบบผงมีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอน นิยมใช้โดยการเติมถ่านกัมมันต์แบบผงพร้อมกับการเติมสารที่ทำให้เกิดตะกอน (Coagulant) ลงในถังตกตะกอน ซึ่งถ่านกัมมันต์จะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นกลุ่มตะกอน ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง

2. ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (Granular Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ไม่สามารถผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 50 ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดมีขนาดให้เลือกใช้งานหลายขนาด เช่น ถ่านกัมมันต์ขนาด 8x20 (ซึ่งหมายถึงถ่านกัมมันต์มีขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาแต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 20 ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาได้) ถ่านกัมมันต์ขนาด 20x40 หรือถ่านกัมมันต์ขนาด 8x30 แต่ขนาดที่นิยมใช้ในงานด้านน้ำเสียมากที่สุดคือ ถ่านกัมมันต์ขนาด 8x30 และ ถ่านกัมมันต์ขนาด 12x40 (U.S. Army Corps of Engineers, 2001) ขนาดของถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดโดยทั่วไปแสดงค่าในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดของถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดโดยทั่วไป (AWWA, 1998)

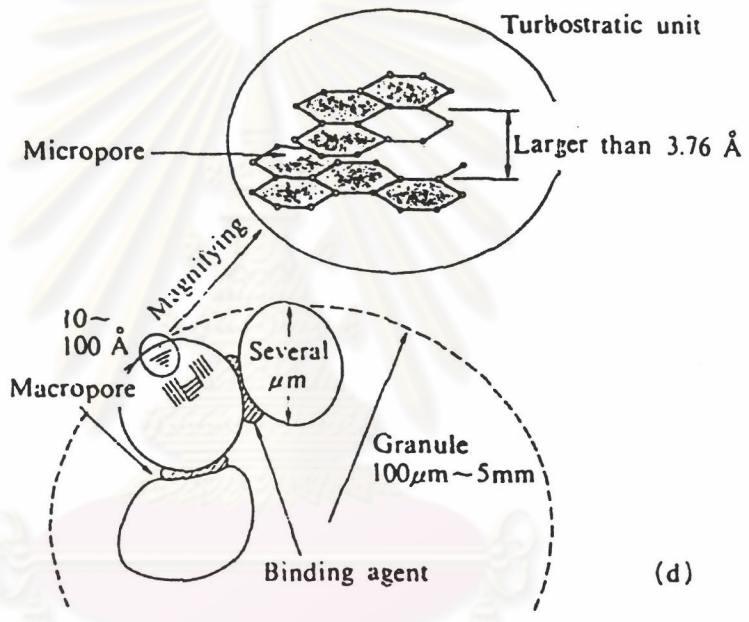
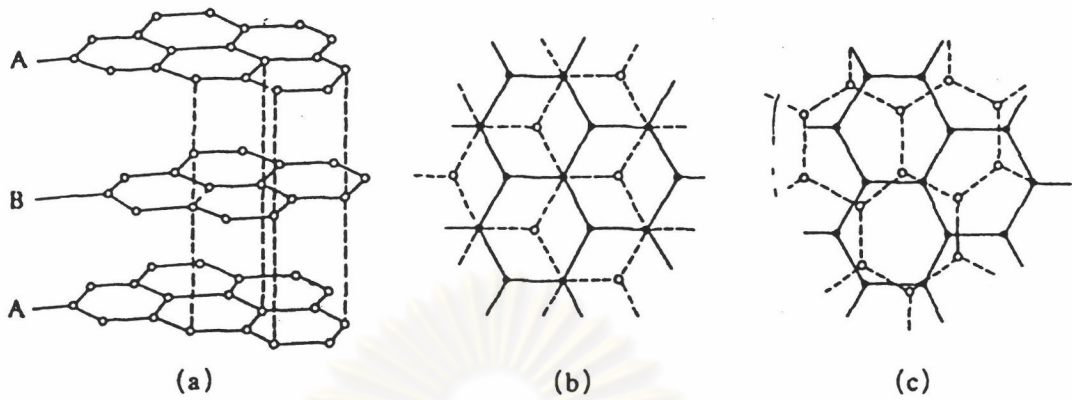
ขนาดของถ่านกัมมันต์ (ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (มิลลิเมตร)
8x16	1.180-2.36
8x20	0.850-2.36
8x30	0.600-2.36
10x30	0.600-2.00
12x40	0.425-1.70
14x40	0.425-1.40
20x40	0.425-0.85
20x50	0.300-0.85

2.3 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

2.3.1 ถ่านกัมมันต์

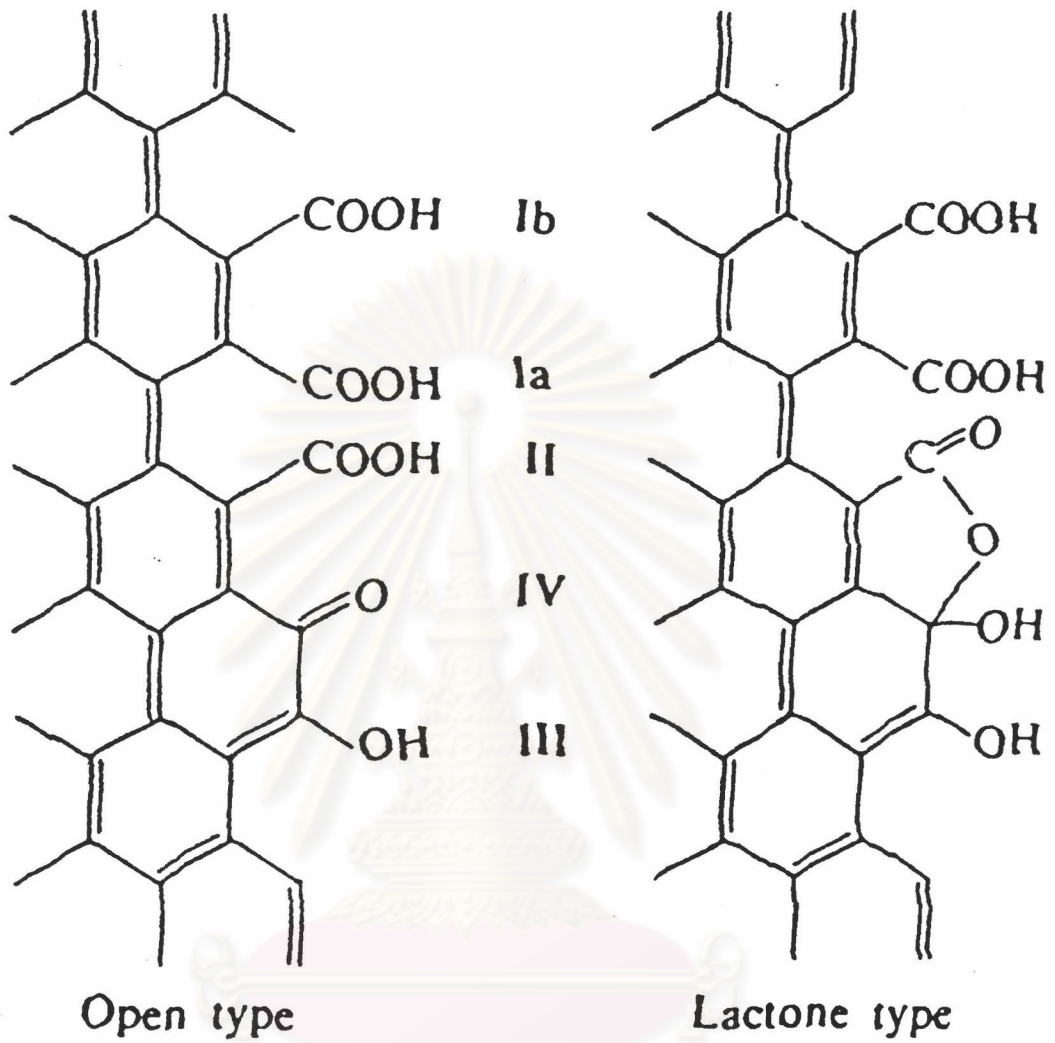
พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ โดยปกติพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน (Pore size) ของถ่านกัมมันต์ว่ามีความเหมาะสมกับขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิวหรือไม่ โดยสามารถแบ่งขนาดของรูพรุนได้เป็น 3 ขนาด ได้แก่ ไมโครพอร์ (Micropores) เป็นรูพรุนที่มีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร มีโซพอร์ (Mesopores) เป็นรูพรุนที่มีขนาดระหว่าง 2-50 นาโนเมตร และมาโครพอร์ (Macropores) เป็นรูพรุนที่มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสามารถวัดโดยใช้วิธี BET (Brunauer, Emmett and Teller Method) ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์คือ ของแข็งสามารถดูดโมเลกุลของไนโตรเจนแก๊สให้ติดอยู่ที่บริเวณพื้นที่ผิวของของแข็งได้ ปริมาณของไนโตรเจนแก๊สที่ถูกดูดติดผิวจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันของระบบ ซึ่งสามารถวัดได้และนำไปคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนได้

คุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่สำคัญคือ สมบัติเชิงเคมีของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยจะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิต ชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ เป็นต้น โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างเป็นกลุ่มคาร์บอนที่มีลักษณะคล้ายกราไฟท์ (Graphite) แต่จะมีโครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystallite) ในลักษณะที่เป็นโครงสร้างเทอร์โบสเตรติก (Turbostratic Structure) ดังรูปที่ 2.3 โดยพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ พื้นที่ผิวที่ไม่มีขั้ว (Non-polar Surface) ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของคาร์บอน ทำให้การดูดติดผิวเกิดขึ้นโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ส่วนแบบที่สองคือพื้นที่ผิวที่มีกลุ่มออกไซด์ (Oxide Groups Surface) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ตัวอย่างของกลุ่มออกไซด์ได้แก่ กลุ่มคาร์บอกซิล (Carboxyl Group) กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) เป็นต้น ทำให้เกิดสมบัติความเป็นขั้วขึ้นกับถ่านกัมมันต์ เพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวให้กับถ่านกัมมันต์ โดยกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้อาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาฮาโลจิเนชัน (Halogenation) ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) กับสารที่ถูกดูดติดผิวได้ (Motoyuki, 1990)



รูปที่ 2.3 (a) และ (b) โครงสร้างของกราไฟท์ (c) โครงสร้างเทอร์โบสตรัทติก และ (d) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Motoyuki, 1990)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร

รูปที่ 2.4 กลุ่มออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (Motoyuki, 1990)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 สารถูกดูดติดผิว

อิทธิพลของสารถูกดูดติดผิวที่มีต่อการดูดติดผิว ขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว โดยทั่วไปสารถูกดูดติดผิวที่ละลายในตัวทำละลายได้ดีมักจะเกิดการดูดติดผิวได้ไม่ดี เนื่องจากสารที่ละลายในตัวทำละลายได้หรือแตกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับตัวทำละลายได้อย่างเหนียวแน่น จึงยากต่อการดูดติดผิว โมเลกุลที่มีโซ่เป็นกิ่งก้านสาขา (Branch Chain) มีแนวโน้มที่จะเกิดการดูดติดผิวที่ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ตรง (Straight Chain) โมเลกุลที่มีหมู่แทนที่ (Substituent Group) ที่แตกต่างกันก็จะมีความสามารถในการดูดติดผิวที่แตกต่างกันออกไป (Eckenfelder, 1989)

2.3.3 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

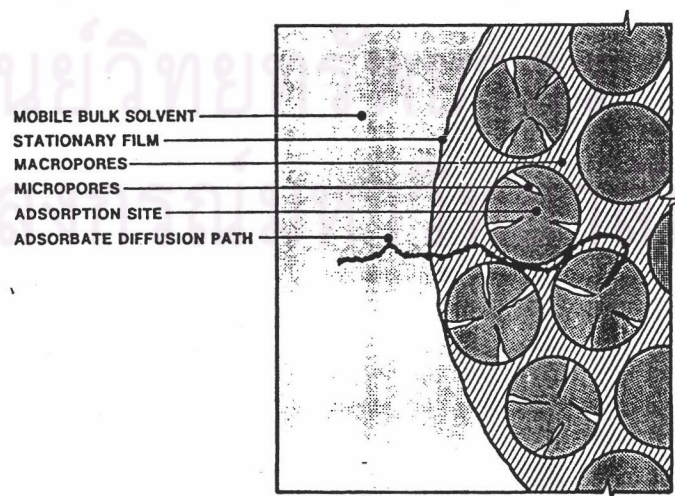
ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายในตัวทำละลายของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวด้วย (มันสิน, 2538)

2.3.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic Reaction) (มันสิน, 2538)

2.3.5 ความดันป่วน

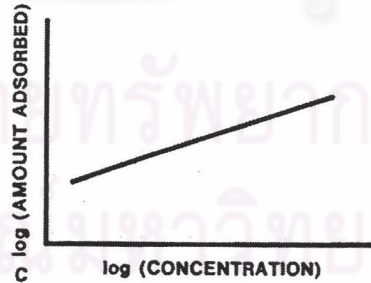
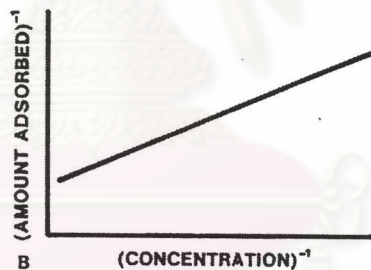
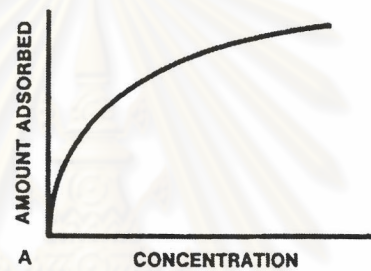
อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับความดันป่วนของระบบ (มันสิน, 2538) ถ้าตัวทำละลายมีความดันป่วนต่ำ ฟิล์มของตัวทำละลายซึ่งล้อมรอบถ่านกัมมันต์จะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้าม ถ้าตัวทำละลายมีความดันป่วนสูง ทำให้ตัวทำละลายไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มของตัวทำละลายเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดติดผิวไปสู่ถ่านกัมมันต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดติดผิวไปสู่ถ่านกัมมันต์ (Neely และ Isacoff, 1982)

2.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงถึงการกระจายตัวของสารที่ถูกดูดติดผิวระหว่างสารดูดติดผิวกับสารละลาย ณ จุดสมดุล โดยทั่วไปไอโซเทอมสำหรับการดูดติดผิวจากสารละลายจะเป็นดังรูปที่ 2.6A กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งโดยปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ณ จุดสมดุล และค่อย ๆ เข้าสู่ค่าคงที่ ไอโซเทอมมักจะถูกดัดแปลงให้อยู่ในรูปกราฟเส้นตรงเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์หลักการดูดติดผิวและทำนายข้อมูลในช่วงที่ไม่ได้อยู่ในช่วงการทดลอง โดยใช้สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) ดังรูปที่ 2.6B และ 2.6C ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 A ไอโซเทอมการดูดติดผิวจากสารละลาย
 B กราฟที่ได้จากการแปลงให้อยู่ในรูปของเส้นตรงโดยใช้สมการแลงเมียร์
 C กราฟที่ได้จากการแปลงให้อยู่ในรูปของเส้นตรงโดยใช้สมการฟรุนดลิช
 (Neely และ Isacoff, 1982)

2.4.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีสมมุติฐานคือ พื้นที่ดูดติดผิวสามารถดูดติดผิวได้เพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น ทำให้เป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และพลังงานการดูดติดผิวเท่ากันทุกจุด สามารถแสดงด้วยสมการ (1) (Kenneth, Vassilios และ Wain-Sun Hau, 1992)

$$q = \frac{bq_m C_e}{1 + bC_e} \quad (1)$$

โดยที่ q = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (mg/g)
 q_m = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่มากที่สุดที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/l)
 b = ค่าคงที่ทางพลังงานการดูดติดผิว (l/mg)

และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (2)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{bq_m C_e} \quad (2)$$

2.4.2 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีสมมุติฐานคือ พื้นผิวของสารดูดติดผิวมีลักษณะแตกต่างกันและมีความสามารถในการดูดติดผิวไม่เท่ากัน แต่ยังคงถือว่าการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว สามารถแสดงด้วยสมการ (3) (Kenneth และคนอื่นๆ, 1992)

$$q = KC_e^{1/n} \quad (3)$$

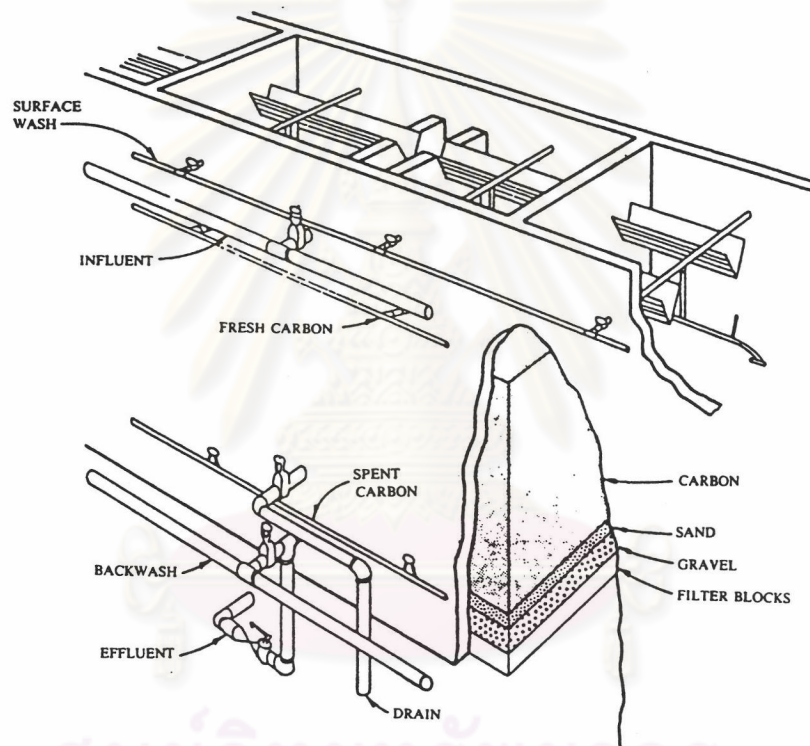
โดยที่ q = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/l)
 K, n = ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสารดูดติดผิว ชนิดของสารถูกดูดติดผิว และอุณหภูมิ
 (n ไม่มีหน่วยและหน่วยของ K เท่ากับ หน่วยของ q หารด้วยหน่วยของ $C_e^{1/n}$)

และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (4)

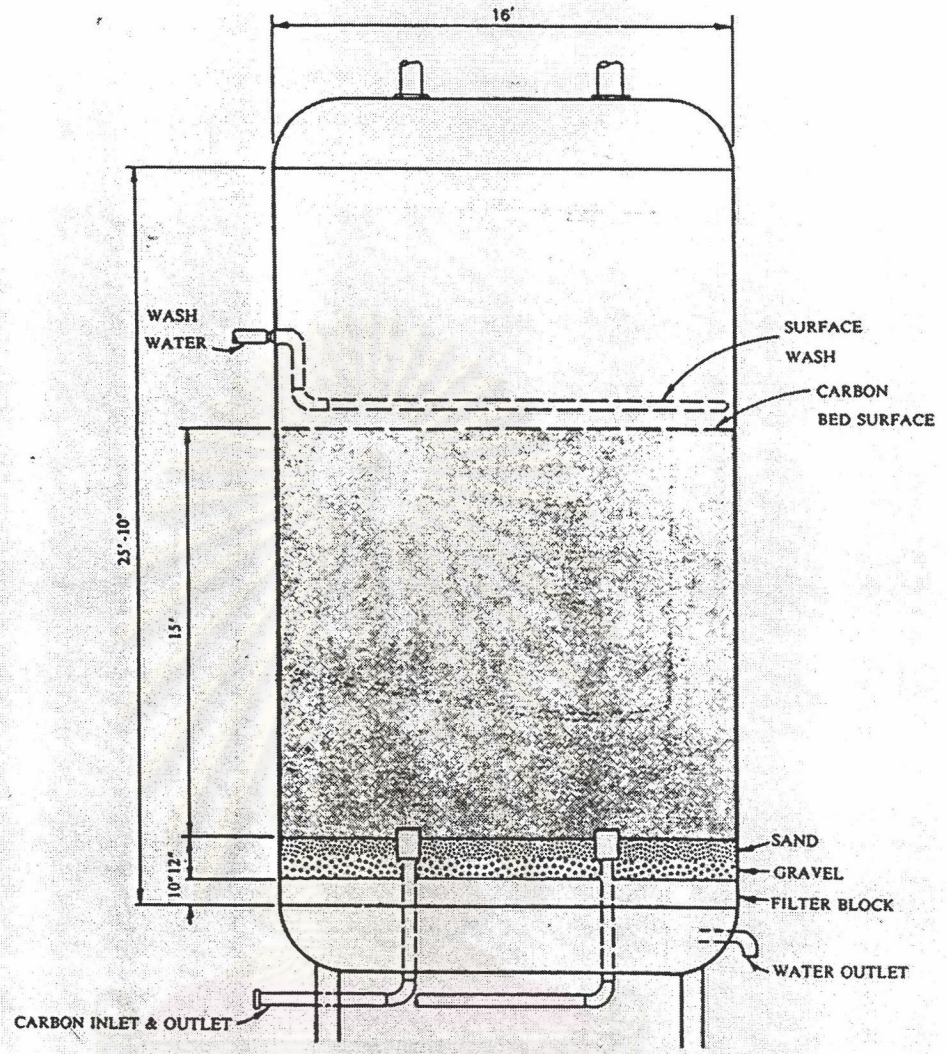
$$\log(q) = \log(K) + \left(\frac{1}{n}\right)\log(C_e) \quad (4)$$

2.5 การใช้งานถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด

การใช้งานถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดนั้นต้องบรรจุในถังและปล่อยให้ น้ำไหลผ่าน ลักษณะการใช้งานจึง คล้ายกับถังกรองมาก ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดอาจนำมาใช้ร่วมกับถังกรองทรายหรือใช้ตามลำพัง ถังถ่านกัมมันต์ อาจเป็นแบบถังเปิดที่มีน้ำไหลผ่านด้วยแรงดันปกติดังรูปที่ 2.7 หรืออาจเป็นถังปิดที่ทำงานภายใต้แรงดันสูงได้ ดังรูปที่ 2.8 ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดที่เสื่อมสภาพแล้วสามารถถูกนำไปทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) ให้มี ความสามารถในการดูดติดผิวกลับคืนมาได้

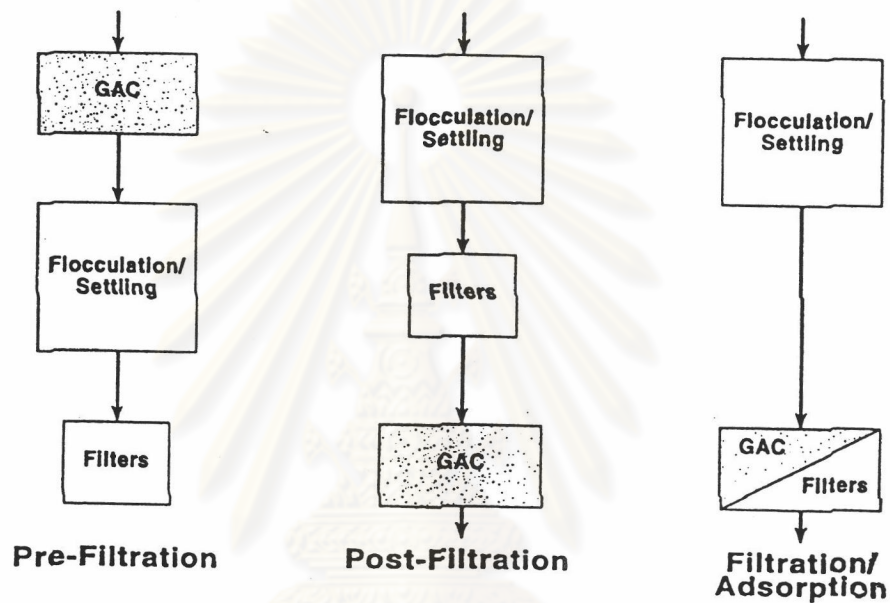


รูปที่ 2.7 ถังถ่านกัมมันต์แบบถังเปิด (มันสิน, 2538)



ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ
รูปที่ 2.8 ถังถ่านกัมมันต์แบบที่มีความดัน (มันสัน, 2538)
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (GAC) สามารถวางไว้ได้หลายตำแหน่ง เช่น วางไว้ในตำแหน่งก่อนการกรอง (Pre-filtration) หลังการกรอง (Post-filtration) หรือวางไว้ในตำแหน่งเดียวกับการกรอง ดังรูปที่ 2.9 การที่จะวางไว้ในตำแหน่งใดนั้นขึ้นขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน แต่ตำแหน่งที่นิยมมากที่สุดคือวางไว้ในตำแหน่งหลังการกรอง เนื่องจากน้ำที่ผ่านการกรองแล้วเท่ากับได้รับการบำบัดในขั้นปฐมภูมิแล้ว ดังนั้นระบบดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์จึงทำหน้าที่เพียงแค่ลดสารอินทรีย์ที่ละลายมาในน้ำเท่านั้น ซึ่งเป็นการใช้งานที่เกิดประโยชน์มากที่สุด (American Water Works Association [AWWA] และ American Society of Civil Engineers [ASCE], 1998)



รูปที่ 2.9 การวางตำแหน่งระบบดูดติดผิวถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (AWWA และ ASCE, 1998)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 การออกแบบระบบดูดติดผิวถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด

ในการออกแบบระบบดูดติดผิวถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงได้แก่

2.6.1 การเลือกถ่านกัมมันต์

การเลือกถ่านกัมมันต์ขึ้นกับความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการลดสารถูกดูดติดผิวที่ต้องการได้ตามความต้องการ โดยต้องมีการคำนึงถึงความดันลด (Pressure Drop) การรีเจนเนอเรชัน เป็นต้น การที่จะเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดใดนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้การทดสอบไอโซเทอมในห้องปฏิบัติการ (U.S. Army Corps of Engineers, 2001)

2.6.2 เวลาสัมผัสและเบรคทวร์จ (Contact Time and Breakthrough)

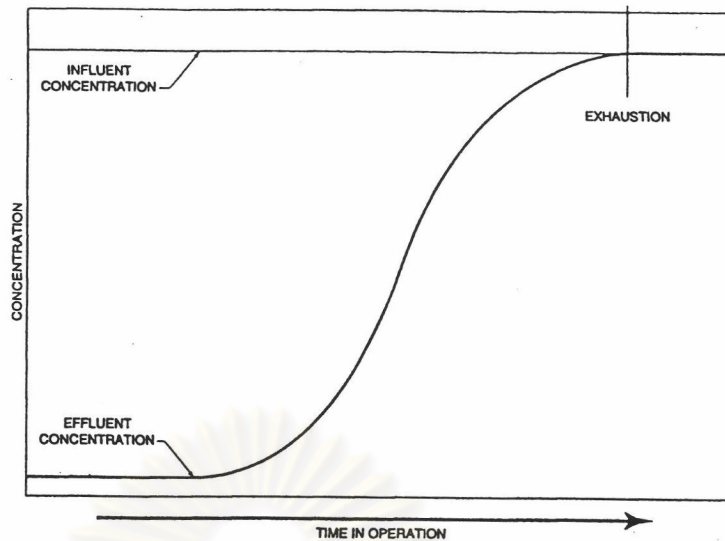
เวลาสัมผัสและเบรคทวร์จเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบดูดติดผิว เวลาสัมผัสหรือ Empty Bed Contact Time (EBCT) หมายถึงปริมาตรของถ่านกัมมันต์หารด้วยอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์หรือเขียนได้ดังสมการ (5) (U.S. Army Corps of Engineers, 2001)

$$EBCT = \frac{V}{Q} = \frac{LA}{Q} \quad (5)$$

โดย V = ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ในภาชนะบรรจุ (m^3)
 A = พื้นที่หน้าตัดของชั้นถ่านกัมมันต์ (m^2)
 L = ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (m)
 Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (m^3/s)

เวลาสัมผัสสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ที่อัตราการไหลคงที่หรือเปลี่ยนอัตราการไหลที่ความสูงของถ่านกัมมันต์คงที่ เวลาสัมผัสมีผลต่อการเข้าสู่จุดเบรคทวร์จช้าหรือเร็ว ถ้าเวลาสัมผัสน้อยจะทำให้ถึงจุดเบรคทวร์จเร็ว และถ้าเวลาสัมผัสมากจะทำให้ถึงจุดเบรคทวร์จช้า โดยทั่วไปเวลาสัมผัสที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียจะอยู่ในช่วง 5-25 นาที (U.S. Army Corps of Engineers, 2001)

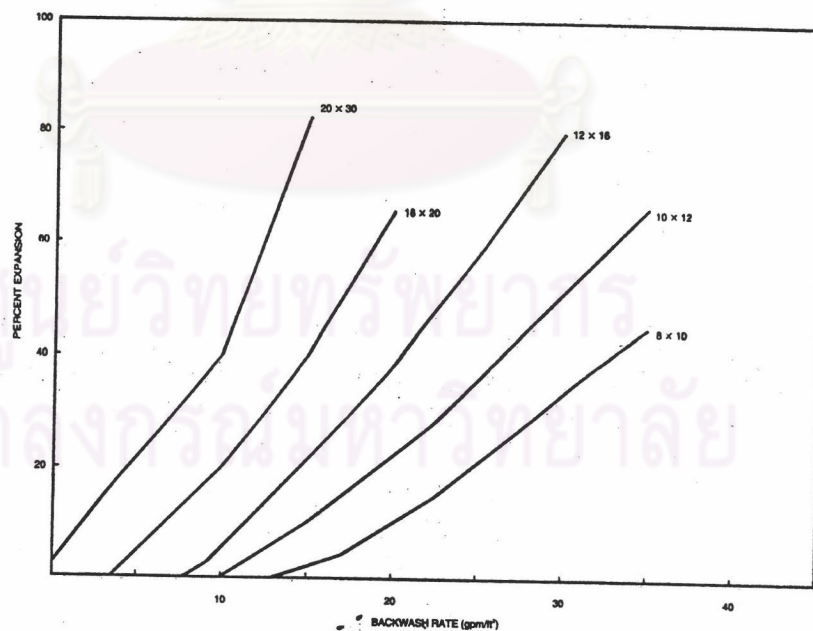
จุดเบรคทวร์จหมายถึงจุดที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่เหลืออยู่ในน้ำเสียอยู่ในระดับที่ต้องการ โดยวัดความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในทางออก (Effluent) ของระบบดูดติดผิว เบรคทวร์จขึ้นกับคุณสมบัติของของน้ำเสียขาเข้า (Influent) สู่ออกแบบดูดติดผิว ดังจะเห็นจากรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงกราฟเบรคทวร์จของถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด กราฟเบรคทวร์จมีความสำคัญสำหรับผู้ออกแบบระบบดูดติดผิว เนื่องจากแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่สนใจกับเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ ซึ่งจากรูปเบรคทวร์จจะทำให้ทราบถึงความลึกของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ในการลดสารถูกดูดติดผิวให้ถึงความเข้มข้นที่ต้องการ หรือเวลาที่ถ่านกัมมันต์หมดสภาพ (Exhaustion) (AWWA และ ASCE, 1998)



รูปที่ 2.10 กราฟเบรคทรูจ์ของถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (AWWA และ ASCE, 1998)

2.6.3 ปริมาตรของถังบรรจุและความลึกของถ่านกัมมันต์ (Adsorber Volume and Bed Depth)

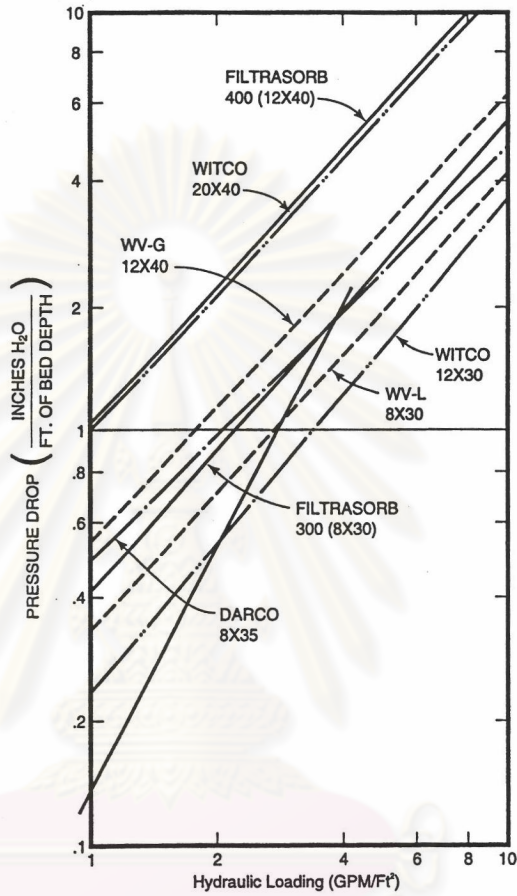
ความลึกของถ่านกัมมันต์สามารถกำหนดได้จากเวลาสัมผัสที่ใช้ สำหรับปริมาตรของถังบรรจุนอกจากจะขึ้นกับความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แล้วยังขึ้นกับพื้นที่ว่างสำหรับการขยายตัวของถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลาการล้างย้อน (Backwashing) โดยสามารถกำหนดพื้นที่ว่างได้สูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ (AWWA และ ASCE, 1998) ถ่านกัมมันต์แต่ละขนาดจะมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวในช่วงเวลาการล้างย้อนต่างกันไปดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวของถ่านกัมมันต์ขนาดต่าง ๆ ขณะการล้างย้อน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (AWWA และ ASCE, 1998)

2.6.4 อัตราการบำบัด (Hydraulic Loading Rate, HLR)

อัตราการบำบัดหมายถึงปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่หน้าตัดของชั้นถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยเวลา โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น gpm/ft² หรือ m³/m².hr โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดกับความดันลดแตกต่างกันไปดังรูปที่ 2.12



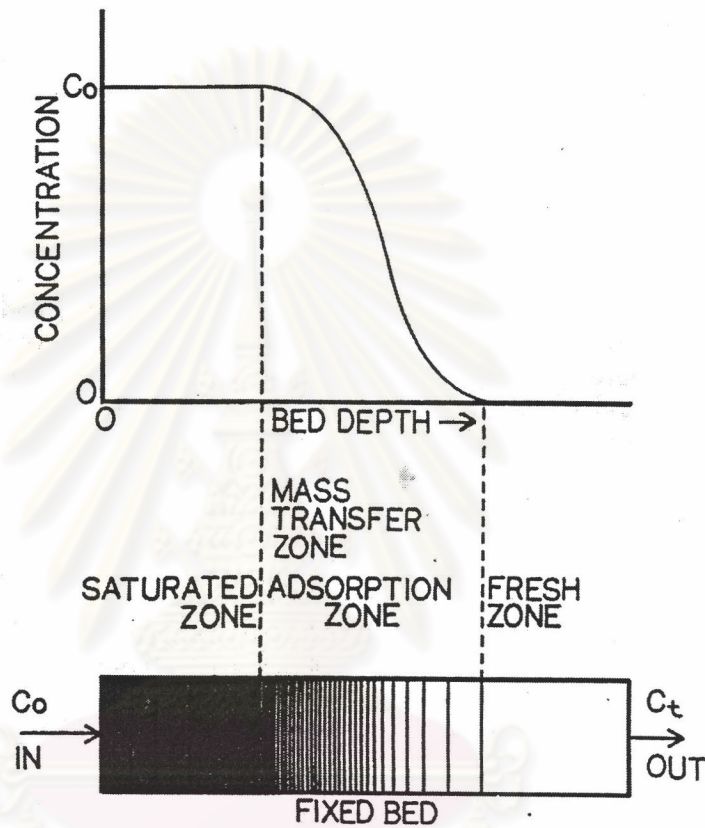
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดกับความดันลด

ของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ (AWWA และ ASCE, 1998)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 บริเวณการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone)

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นสารดูดซับจะเกิดบริเวณการถ่ายเทมวล ซึ่งเป็นบริเวณที่สารดูดซับกำลังดูดซับสารที่ถูกดูดซับ หรือเรียกว่าบริเวณที่เกิดการดูดซับ (Adsorption Zone) โดยบริเวณการถ่ายเทมวลจะค่อย ๆ เคลื่อนที่จากด้านขาเข้าของสารดูดซับไปยังด้านขาออก สารดูดซับจะค่อย ๆ อิ่มตัวโดยบริเวณที่เกิดการอิ่มตัวของสารดูดซับเรียกว่าบริเวณอิ่มตัว (Saturation Zone) ซึ่งบริเวณอิ่มตัวจะเริ่มจากด้านขาเข้าของสารดูดซับไปยังด้านขาออกซึ่งยังไม่อิ่มตัว (Fresh Zone) ดังรูปที่ 2.13

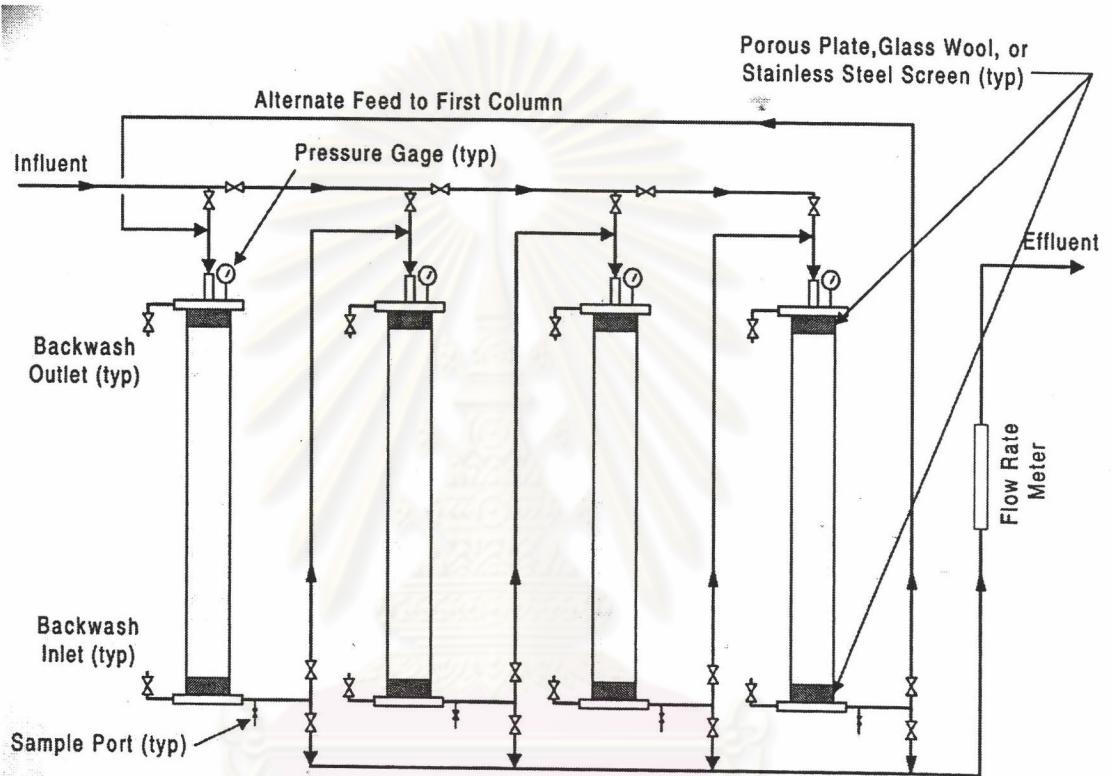


รูปที่ 2.13 รูปแบบความเข้มข้นของสารดูดซับดูดซับผ่านชั้นของถ่านกัมมันต์
(Kenneth, Vassilios และ Wain-Sun Hou, 1992)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 ระบบดูดติดผิวคอลัมน์จำลอง (Pilot Column)

การศึกษาแนวทางในการออกแบบระบบดูดติดผิว จำเป็นต้องใช้ระบบดูดติดผิวจำลองเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองกับระบบจริง โดยทั่วไประบบดูดติดผิวคอลัมน์จำลองจะประกอบด้วยคอลัมน์เรียงต่อกันเป็นอนุกรมอย่างน้อย 4 คอลัมน์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 50-150 มิลลิเมตร บรรจุถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด 1.8-3.6 เมตร ดังรูปที่ 2.14 และตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เวลาสัมผัส ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ เป็นต้น (U.S. Army Corps of Engineers, 2001)



รูปที่ 2.14 ระบบดูดติดผิวคอลัมน์จำลอง (U.S. Army Corps of Engineers, 2001)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยการทำงานของระบบดูดติดผิวคอลัมน์จำลองจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Bohart-Adams (Eckenfelder, 1989) ดังสมการ (6)

$$t = \frac{N_o}{C_o V} \left[h - \frac{V}{KN_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

โดย

t	=	เวลาเบรคทฤษฎี (hr)
V	=	อัตราการบำบัด ($m^3/m^2 \cdot hr$)
h	=	ความสูงชั้นสารดูดติดผิว (m)
K	=	ค่าคงที่อัตราการดูดติดผิว ($m^3/kg \cdot hr$)
N_o	=	ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิว (kg/m^3)
C_o	=	ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่เข้าสู่ระบบ (kg/m^3)
C_B	=	ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่ออกจากระบบ (kg/m^3)

ถ้าให้ $t = 0$ สมการจะเขียนได้เป็นสมการ (7)

$$h_o = \frac{V}{KN_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \quad (7)$$

ในกรณีนี้ h_o คือความลึกวิกฤต (Critical Bed Depth) คือความลึกของสารดูดติดผิวที่ทำให้ค่า C_o ลดลงเหลือ C_B ได้ในทันที

และจากสมการ Bohart Adams จะหาค่า N_o ได้โดยการวาดกราฟระหว่าง t กับ h ได้เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ $\frac{N_o}{C_o V}$

ส่วนค่า K หาได้จากค่าจุดตัดแกนตั้ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{-1}{KC_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right)$

ผลการทดลองจากระบบดูดติดผิวคอลัมน์จำลอง สามารถหาความลึกของถ่านกัมมันต์ที่เวลาเบรคทฤษฎีที่ต้องการ หรือในทางตรงกันข้ามถ้ากำหนดความลึกของถ่านกัมมันต์จะสามารถหาเวลาเบรคทฤษฎีได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปหาค่าคงที่ N_o และ K ในสมการ Bohart-Adams ในช่วงอัตราการบำบัดที่ทำการทดลอง เพื่อนำไปทำนายเวลาเบรคทฤษฎีสำหรับระบบดูดติดผิวจริงต่อไป

2.9 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jusoh, A.B., Noor, M.J.M.M. และ Piow, S.B., 2002

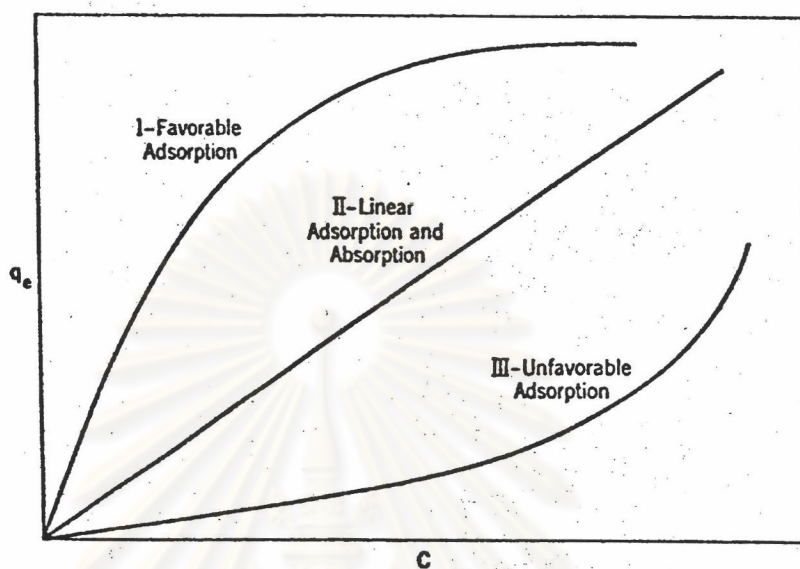
ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter) พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดติดผิวของสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติด้านพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน คือถ่านกัมมันต์ชนิด KI-6070 และถ่านกัมมันต์ชนิด KI-8085 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 277 m²/g และ 547 m²/g ตามลำดับ และทดลองโดยใช้ระบบดูดติดผิวคอลัมน์จำลอง เมื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้สมการ Bohart-Adams พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิด KI-8085 ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่ามีความสามารถในการดูดติดผิวดีกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด KI-6070 ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

Salim, M.R., Othman, F., Imtiaj Ali, Md., Patterson, J. และ Hardy, T., 2002

ได้ศึกษาการกำจัดสารฟีนอลในน้ำ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดรูพรุน และค่า Iodine Number แตกต่างกัน จะมีความสามารถในการดูดติดผิวต่างกัน โดยได้ใช้ถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (CAC) และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม (MOPAS) ซึ่งมีพื้นที่ผิว 38.5 m²/g และ 38.2 m²/g ตามลำดับ ค่า Iodine Number เท่ากับ 674 และ 454 ตามลำดับ และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (CAC) มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม (MOPAS) พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีพื้นที่ผิวเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Surface) เนื่องจากให้ไอโซเทอมที่สอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช และจากการเปรียบเทียบค่าคงที่ K ในสมการฟรุนดลิช ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (CAC) มีค่า K เท่ากับ 0.079 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม (MOPAS) มีค่า K เท่ากับ 0.047 แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (CAC) มีความสามารถในการดูดติดผิวดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม (MOPAS) สอดคล้องกับการที่มีค่า Iodine Number และขนาดรูพรุนที่สูงกว่า และจากการทดสอบด้วยคอลัมน์ดูดติดผิวจำลองและใช้สมการของ Bohart-Adams พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (CAC) สามารถใช้งานได้นานกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม (MOPAS)

Weber, Jr., 1972

ได้ศึกษาการดูดติดผิว ณ เวลาสมมูลการดูดติดผิว พบว่าการกระจายตัวของสารถูกดูดติดผิวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิวที่ใช้ (q_e) กับความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) โดยลักษณะไอโซเทอมทั่วไปมี 3 แบบ คือ ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ แสดงว่าปรากฏการณ์ดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีหรืออีกนัยหนึ่งคือสารดูดติดผิวที่ใช้สามารถดูดติดผิวสารถูกดูดติดผิวได้ดี (Favorable Adsorption) ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นโค้งหงาย แสดงว่าปรากฏการณ์ดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ไม่ดี หรืออีกนัยหนึ่งคือสารดูดติดผิวที่ใช้สามารถดูดติดผิวสารถูกดูดติดผิวได้ไม่ดี (Unfavorable Adsorption) ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าเกิดปรากฏการณ์ทั้งการดูดติดผิวและการดูดซับ (Absorption)



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของสารถูกดูดติดผิว (Weber, 1972)

และศึกษากระบวนการดูดติดผิวในงานด้านการบำบัดน้ำเสีย พบว่าความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิว pH ของสารละลาย ขนาดของถ่านกัมมันต์ ความลึกของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ และอัตราในการบำบัดน้ำเสีย มีอิทธิพลต่อลักษณะของกราฟเบรคทรูจ โดยจุดเบรคทรูจจะถึงเร็วขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวด้านขาเข้าระบบเพิ่มขึ้น pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น อัตราการบำบัดเพิ่มขึ้น หรือความลึกของถ่านกัมมันต์ลดลง เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย