

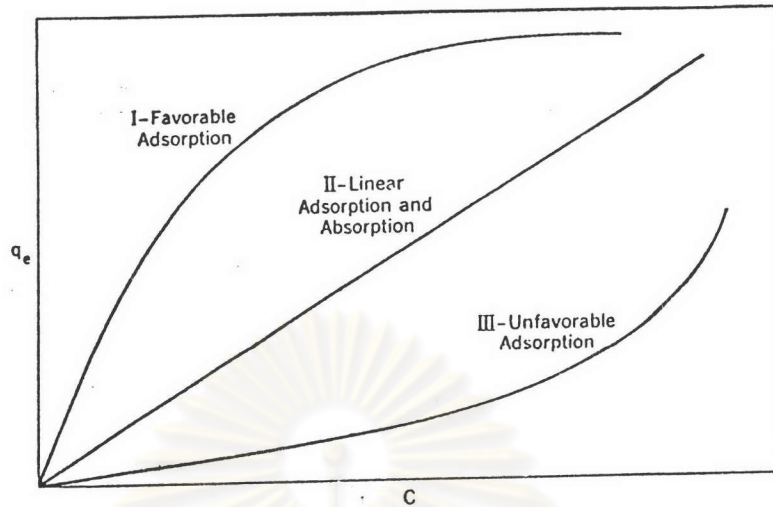
บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดซับของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดซับของสารละลาย เป็นที่ทราบกันดีว่าการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับบนของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านไวงาน (Active carbon) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดื่มและน้ำเสีย การดูดซับเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของ 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของของแข็ง โดยที่ C บนแกนตั้ง หมายถึง ความเข้มข้นของสารในของเหลวที่สัมผัสกับของแข็งบริเวณระหว่างหน้าของของเหลวกับของแข็ง และ q_e บนแกนแนวนอน หมายถึง จำนวนของสารที่ผ่านเข้ามาที่ระหว่างหน้า

จากรูป 2.1 เส้นโค้ง I และ III แสดงถึงการดูดซับโดยความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวของของแข็งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว เส้นโค้งนี้แสดงถึงรูปแบบการดูดซับที่ดี (Favorable) และไม่ดี (Unfavorable) ส่วนเส้นโค้งที่ II แสดงรูปแบบการดูดซับแบบเส้นตรง จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารบนผิวของของแข็ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว



รูปที่ 2.1 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง (Weber, 1972)

การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดซับกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Metcalf and Eddy, 1991) Rizzo (1971) กล่าวว่า การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณอินทรีย์(Organic Load)ที่ไม่คงที่ เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสลัดจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดขนาดของระบบได้ง่าย

2.2 กลไกการดูดซับ และอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Adsorption Process and Rate of Molecular Transfer)

2.2.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding Force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interaction) การดูดซับที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดซับ

ทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับเคมี (Chemisorption) (Eckenfelder, 1981) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยา (Action) ของแรงแวนเดอวาล์ว (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) (Eckenfelder, 1981) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayered) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเพิ่มขึ้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

การดูดซับเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับเคมีแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (Desorption) ขึ้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

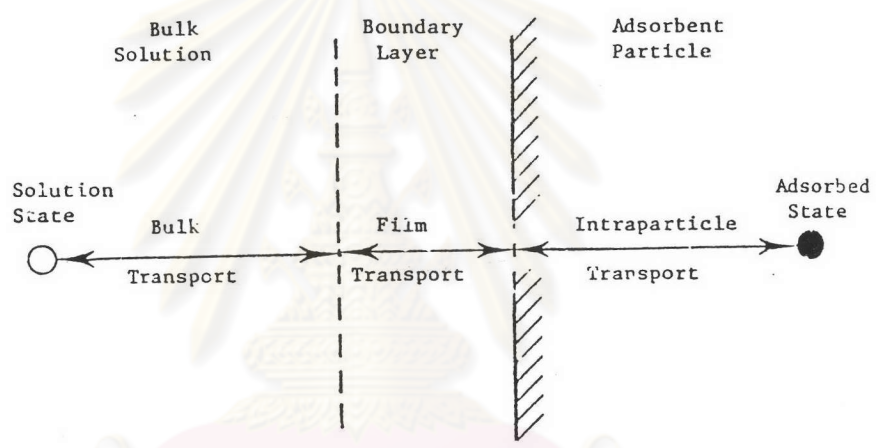
Kiselev (1965, Voice and Weber, 1983) กล่าวว่า ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 Kcal/mol ส่วนการดูดซับเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 Kcal/mol นอกจากนี้ Hassler (1963) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่า การดูดซับทางกายภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดซับเคมีเพิ่มขึ้น

2.2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.2



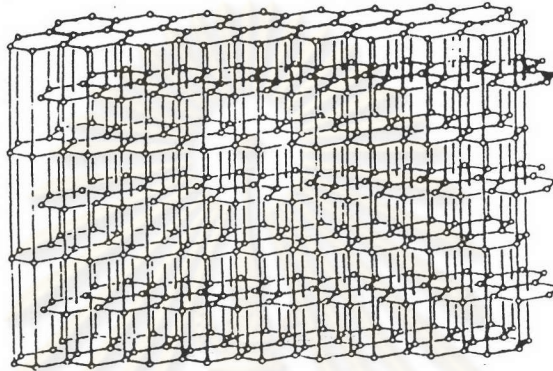
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder,1981)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับผิว แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับผิว

2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

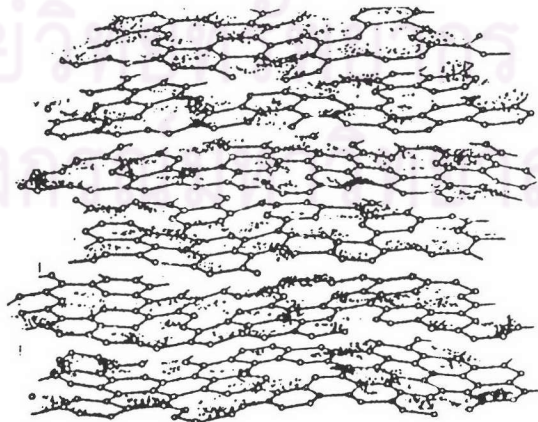
ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟท์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมากมาย กราไฟท์

ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 \AA โดยในแต่ละชั้นเรียงตัวขนานกันระยะห่างระหว่างชั้นมีขนาด 3.35 \AA อิเล็กตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็กตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกราไฟท์ (Faust and Aly, 1987)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟท์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 150 \AA และระยะทางระหว่างผลึกเล็ก ๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง $20-50 \text{ \AA}$ ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Faust and Aly, 1987)



2.3.1 การเตรียมและการกระตุ้น

1) การเตรียม (Preparation) ถ่านกัมมันต์สามารถทำได้จากวัสดุหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับการบำบัดน้ำเสีย มีเพียงวัสดุบางชนิดที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์เท่านั้น ที่สามารถนำไปใช้ได้ เช่น กะลามะพร้าว ขี้เถ้า ถ่านไม้ ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite Coal) เป็นต้น วัสดุแต่ละชนิดจะมีรูพรุนแตกต่างกันซึ่งนำไปใช้ในงานที่แตกต่างกันไป เช่น กะลามะพร้าวที่มีความหนาแน่นมากจะให้คาร์บอนที่มีการกระจายของรูพรุนเล็ก ๆ อย่างมากมาย และมีความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) สูงกว่าคาร์บอนที่ทำจากกระดาษแข็ง ซึ่งคาร์บอนชนิดนี้เหมาะที่จะนำไปใช้ในการดูดซับสีมากกว่าที่จะนำมาใช้บำบัดน้ำเสียเนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อคาร์บอน เช่น การเผาไหม้ ถ้าเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้แตกต่างกันลักษณะของพื้นที่ผิวและความจุของการดูดซับสี (Adsorptive Capacity) ก็จะแตกต่างกัน McCreany และ Snoeyink (1980) ได้ศึกษาความจุของการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ พบว่าความจุของการดูดซับสีมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำถ่านกัมมันต์ DeJoha (1975) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์ (Lignite Coal) มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous Coal)

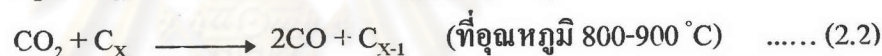
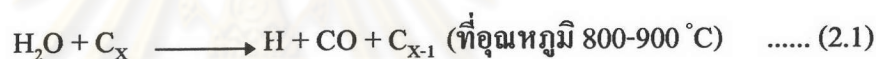
ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (Faust and Aly, 1987)

Bargess	Kelp and seaweed
Beet-sugar sludge	Lampblack
Blood	Leather waste
Bones	Lignin
Carbohydrates	Lignite
Cereals	Molasses
Coal	Nut shells
Coconut shells	Oil sheal
Coffee beans	Peat
Corncobs and corn stalks	Petroleum acid sludge
Cottonseed hulls	Petroleum coke
Distillery waste	Potassium ferrocyanide residue
Fish	Pulp-mill waste
Flue dust	Rice hull
Fruit pits	Rubber waste
Graphite	Sawdust
	Wood

2) การกระตุ้น (Activation Process) โดยทั่วไปในการกระตุ้นมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization Process) และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุจนกระทั่งสารปนเปื้อนที่ไม่ใช่คาร์บอนสลายตัวไป ซึ่งกระบวนการนี้โดยทั่วไปจะกระทำโดยปราศจากอากาศ ถ่านที่ได้จากกระบวนการนี้มีอำนาจการดูดติดผิวต่ำ เนื่องจากโพรงภายในคาร์บอนยังมีทาร์ (Tar) อุดตันอยู่ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2532) ดังนั้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและไล่ทาร์ออกจากโพรงภายในคาร์บอนจะต้องผ่านกระบวนการออกซิเดชันต่อไป

กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งใช้ตัวกระทำที่เป็นก๊าซ (Gaseous Agent) ซึ่งมีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งก๊าซที่ใช้ส่วนใหญ่คือ ไอน้ำ อากาศ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถใช้แยกกันหรือผสมกันก็ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังสมการ (2.1) ถึง (2.4)



ความสามารถของการดูดติดผิว หรือความจุของการดูดติดผิวของคาร์บอนที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการกระตุ้น ซึ่งมีดังนี้

- ก. คุณสมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent)
- ข. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น
- ค. ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น
- ง. ปริมาณและชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของถ่าน

นอกจากวิธีการกระตุ้นซึ่งใช้ก๊าซในการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านแล้ว ยังมีการกระตุ้นโดยใช้สารเคมี (Chemical Activation) ซึ่งวิธีนี้มีผลต่อการสร้างรูพรุนภายในคาร์บอนมากกว่าการกระตุ้นซึ่งใช้ก๊าซที่มีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวภายนอก สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นต้น คุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยวิธีและวัสดุที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ทำจากต้นสน (Pine Wood Char) โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซที่อุณหภูมิต่างกัน (Faust and Aly, 1987)

Activation Conditions		Substance adsorbed (g/g carbon)			
Gas	Temperature(°C)	Chrysoidine R	Ponceau R	Aniline Blue	Iodine
Air	600	0.34	0.10	0.05	0.36
Air	740	0.16	0.08	0.05	0.40
Air	790	0.15	0.08	0.06	0.42
Air	860	0.14	0.08	0.06	0.42
Air	910	0.13	0.10	0.06	0.40
Steam	770	0.37	0.19	0.16	0.60
Steam	825	0.37	0.17	0.17	0.60
Steam	880	0.36	0.16	0.21	0.62
CO ₂	880	0.32	0.12		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของคาร์บอนที่มาจากวัสดุและกระบวนการกระตุ้นที่ต่างกัน (Eckenfelder, 1981)

Activated Agent and Raw Material	Volume on Pores of Given Radii (Å), ml/g.				Area in Pores of Given Radii (Å), ml ² /g.				Mean Pore Radius, Å	CCl ₄ Capacity g.CCl ₄ /100g.Carbon		Molasses R.E. d.b.
	<16	16-1000	>1000	All	<16	16-1000	>1000	All		Absorbed	Retained	
Steam-Lignite, DARCO 12 x 30 Mesh	0.284	0.448	0.220	0.952	450	193	1.4	644	29.6	43.0	11.0	101
Steam-Wood Charcoal, DARCO G-60 Sp.	1.212	0.864	0.252	2.328	1068	289	2.2	1359	34.3	-	-	172
H ₃ PO ₄ -Activated Wood, DARCO KB	0.610	1.349	0.606	2.565	1161	538	3.7	1703	30.1	110.0	14.9	336
Steam-Coconut Shell Char, Barnebey - Cheney AC	0.475	0.056	0.061	0.592	1198	26	0.3	1224	9.7	62.2	33.9	<20
Steam-Bituminous Coal, Calgon SGL, 8x30	0.302	0.197	0.355	0.854	955	84	1.2	1040	16.4	-	-	60
Steam-Bituminous Coal, Calgon BPL, 12x30	0.391	0.110	0.161	0.662	1200	40	1.2	1241	10.7	62.5	29.4	<20
Steam-Petroleum Coke, Columbia CXC, 6x8	0.393	0.156	0.224	0.773	1366	59	0.9	1426	10.8	68.5	38.0	<20
Steam-Petroleum Coke, Witco 142	0.535	0.101	0.029	0.665	1424	41	0.2	1465	9.1	-	-	<20
Steam-Coconut Shell Char m, Experimental	0.490	0.113	0.073	0.576	1199	47	0.4	1246	10.8	62.1	33.7	<20
Steam-Pecan Shell Char m, Experimental	0.477	0.291	0.327	1.065	652	116	1.6	770	27.7	-	-	70
H ₃ PO ₄ -Coconut Shell, Experimental	0.373	0.561	0.122	1.056	1216	275	0.6	1492	14.2	106.0	9.35	290
H ₃ PO ₄ -Pecan Shell, Experimental	0.635	0.457	0.188	1.280	1229	175	0.9	1405	18.2	-	-	233
ZnCl ₂ -Lignite, Experimental	0.134	1.370	0.107	1.611	493	697	0.8	1191	27.1	-	-	345

2.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ (General Physical Properties)

ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งมีคุณสมบัติบางประการที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้ในระบบวนการต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับใช้ในระบบวนการต่าง ๆ (Faust and Aly, 1987)

Density	Content of :
Particle size distribution	Sulfer
Porosity	Sulfides
Surface area	Sulfates
Filtration rate	Phosphates
Wettability	Chlorides
Dustiness	Iron
Ignition temperature	Copper
Electrical conductivity	Zinc
Cil retention	Calcium
Moisture	Magnesium
pH	Silica
Total ash	
Resistance to attrition	
Hardness	
Water-extractable inorganics	
Acid-soluble inorganics	

คุณสมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ ที่นำมาใช้สำหรับกำหนดการใช้งานของถ่านกัมมันต์นั้น ๆ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) คือ

- ก. พื้นที่ผิว (Surface Area) : ใช้กำหนดขีดความสามารถของการดูดซับ
- ข. ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) : ใช้บอกถึงโอกาสสูญเสียจากการใช้งาน
- ค. ความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) : ใช้กำหนดปริมาณถ่านที่ใช้
- ง. ขนาดประสิทธิผล (Effective Size) : กำหนดสภาพทางชลศาสตร์
- จ. ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) : ใช้กำหนดการดูดซับของโมเลกุล

ฉ. การวิเคราะห์การผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) : ใช้ตรวจสอบและกำหนดการบ่งคับควบคุมระบบ

ช. อะบราชันนัมเบอร์ (Abrasion Number) : ระบุถึงความคงทนต่อการขัดสี

ซ. ร้อยละของเถ้า (Ash Percent) : ระบุปริมาณของกากที่เหลือจากการเผา

ฅ. ความชื้น (Moisture) : ระบุปริมาณของน้ำในถ่านกัมมันต์

ฉ. ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ค. โมลาสนัมเบอร์ (Molasses Number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ฌ. ฟีนอลนัมเบอร์ (Phenol Number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิว

จ. ขนาดรูพรุน (Pore Size) : ใช้กำหนดขีดจำกัดในการดูดติดผิวโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัสดุ และการกระตุ้นที่แตกต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดก็คือ พื้นที่ผิว และความพรุน

1) พื้นที่ผิว (Surface Area) โดยปกติถ่านกัมมันต์ทั่วไปจะมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 500-2,000 m^2/g (Hyndshaw, 1972) ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่พบมากที่สุดมีค่าประมาณ 1,000 m^2/g (Cheremisinoff, Valent and Wright, 1976) ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 500 m^2/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้น้ำมันเป็นวัตถุดิบในการผลิตจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า 2,000 m^2/g (Diamadopoulos, Samaras and Sakellaropoulos, 1992) ตัวอย่างพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5 ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมาก ไม่จำเป็นที่จะต้องดูดติดผิวของโมเลกุลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า จากการศึกษาของ DeJohn (1975) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินบิทูมินัสซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์ เมื่อนำไปบำบัดน้ำเสียชุมชน มีประสิทธิภาพเท่ากับถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์

ตารางที่ 2.5 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Faust and Aiy, 1987)

Carbon	Source	Surface Area (m ² /g)
PCC SGI	Bituminous coal	1,000-1,200
FCC BCL	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
Norit (various)	Wood	700-1,400

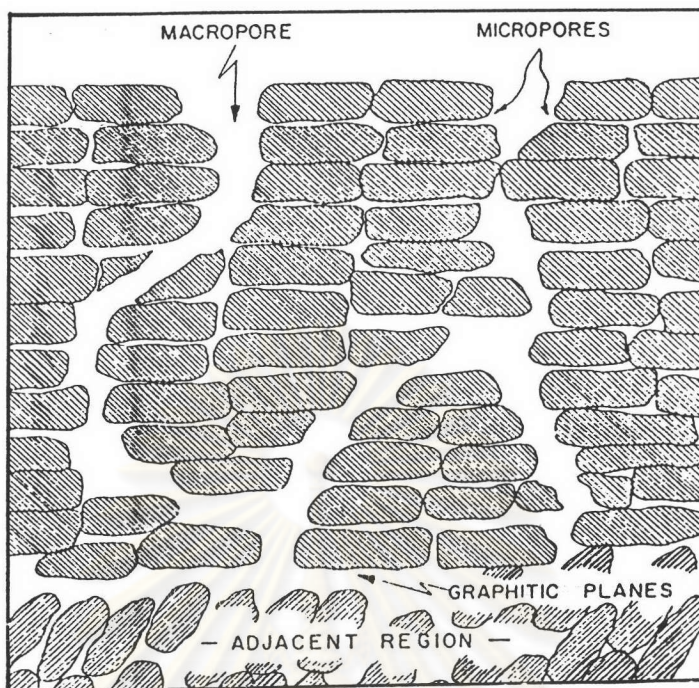
2) ความพรุน (Porosity) โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์ทั่วไปมีปริมาณความพรุนอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 ml/g จากลักษณะและขนาดของรูพรุน สามารถแบ่งรูพรุนได้เป็น 3 ขนาด (Dubinin, 1966 quoted in Bell and Molof, 1975) คือ

ก. มาโครพอร์ (Macropores) ขนาดของมาโครพอร์ที่พบในถ่านกัมมันต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 5,000-20,000 Å ปริมาณความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ml/g ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของมาโครพอร์นี้มักจะไม่ค่อยสนใจสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 m²/g

ข. ทรานซิชันนอลพอร์ (Transitional Pores) มีรัศมีอยู่ระหว่าง 20-1,000 Å มีปริมาณความพรุนอยู่ระหว่าง 0.02-0.1 ml/g มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

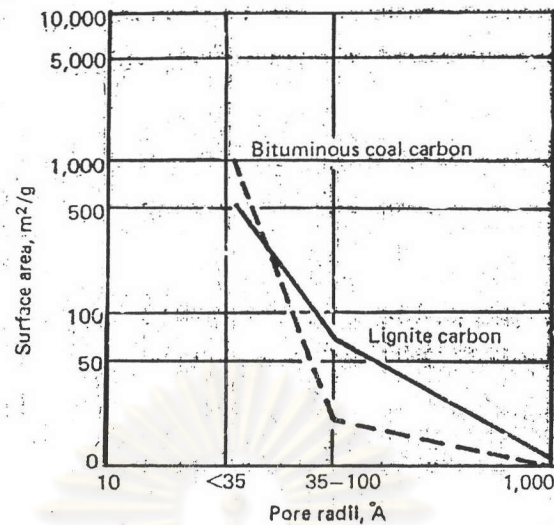
ค. ไมโครพอร์ (Micropores) มีรัศมีน้อยกว่า 20 Å ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6-8 Å ปริมาณความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-0.5 ml/g และมีพื้นที่ผิวจำเพาะอย่างน้อยที่สุด 95 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

ในรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น มาโครพอร์จะเป็นรอยแตกที่ผิวของคาร์บอน ทรานซิชันนอลพอร์จะแตกสาขาออกมาจากมาโครพอร์ และไมโครพอร์ก็จะแตกสาขาออกมาจากทรานซิชันนอลพอร์



รูปที่ 2.5 รูปแสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ (Faust and Aly, 1987)

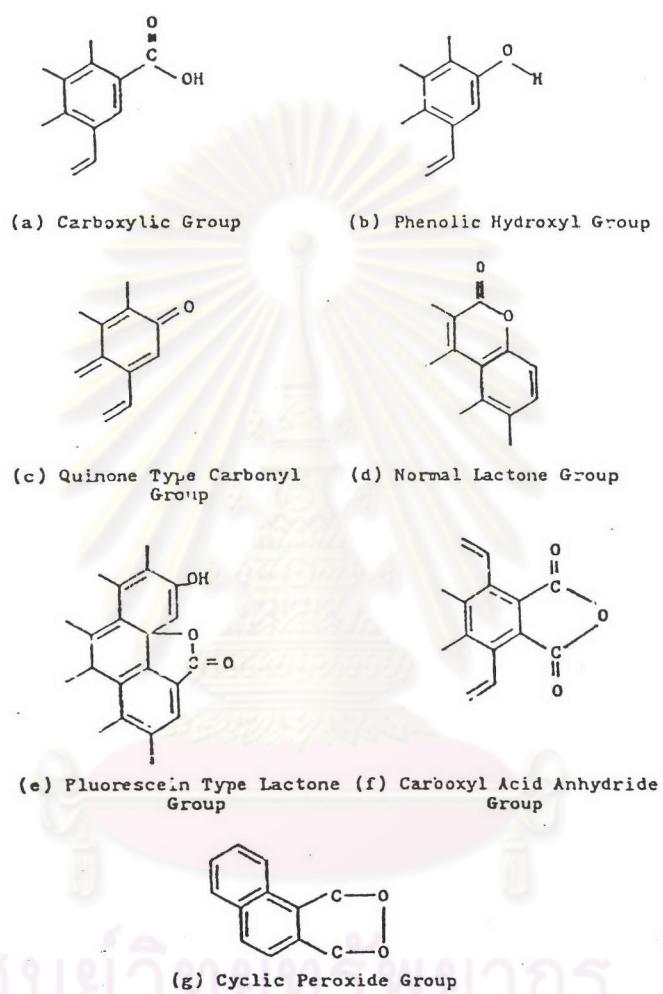
จากคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ คือ ไอโอดีนนัมเบอร์ และโมลาสนัมเบอร์ Juhola (1977, Lee, Snoeyink and Crittenden, 1981) ได้แสดงความสัมพันธ์ของไอโอดีนนัมเบอร์กับพื้นที่ผิวของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 10 \AA และโมลาสนัมเบอร์กับพื้นที่ผิวของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 28 \AA Huang และ Garrett (1977) กล่าวว่า คาร์บอนที่ทำจากถ่านหินมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับส่วนใหญ่ คือ ไมโครพอร์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง $60-100 \text{ \AA}$ ในขณะที่ คาร์บอนที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์และไม้ มีพื้นที่สำหรับการดูดซับส่วนใหญ่ คือ ทรานซิซันนอลพอร์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง $100-2,000 \text{ \AA}$ Abram (1973, Bell and Molof, 1975) กล่าวว่า ในการดูดซับจากของเหลว ทรานซิซันนอลพอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขนส่งโมเลกุลสารถูกดูดซับไปยังไมโครพอร์ DeJohn (1975) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน ของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านลิกไนต์ และถ่านหินปิทิวมินัส พบว่าถ่านหินปิทิวมินัสมีพื้นที่ผิวรวมมากกว่า และพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของไมโครพอร์ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านลิกไนต์ มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของทรานซิซันนอลพอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน (DeJohn, 1975)

2.3.3 โครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวด้านกัมมันต์ (Surface Functional Groups)

ในกระบวนการกระตุ้นด้านกัมมันต์ จะทำให้โครงสร้างของวงคาร์บอนที่อยู่ในแผ่นชั้นเปลี่ยนไปซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการที่ใช้ กลุ่มของวงที่เปลี่ยนไปนั้นมีผลกระทบต่อระยะทางของแผ่นชั้นที่อยู่ติดกัน บนแผ่นชั้นที่เกิดไมโครคริสตอลไลต์นี้ จะมีอะตอมที่ขอบซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมอื่น ๆ ได้ เช่น ออกซิเจน และไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดกลุ่มฟังก์ชันนอล (Functional Group) หลายชนิดที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของคาร์บอน โครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอน-ออกซิเจน (Carbon-Oxygen Surface Structure) เป็นลักษณะของพื้นผิวที่สำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมของคาร์บอน และจะมีผลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการกระตุ้น กลุ่มของฟังก์ชันนอลที่พบบนพื้นผิวคาร์บอนประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactone, Fluorescein Type Lactone, Carboxylic Acid Anhydride และ Cyclic Peroxide ดังแสดงในรูปที่ 2.7 วิธีที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของคาร์บอนที่ใช้วิธีการกระตุ้น และออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่างกันนี้ จะใช้คุณสมบัติของกรดและเบสของตัวคาร์บอนเป็นตัวกำหนด คาร์บอนที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะคิดถึงผิวของไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบแอล (L-type Carbon) ส่วนคาร์บอนที่กระตุ้นที่อุณหภูมิสูงและคิดถึงผิวของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบเอช (H-type Carbon) ตัวอย่างของคาร์บอนนี้ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.6 ซึ่งจะแสดงปริมาณเบสที่ใช้ในการสะเทินพื้นผิวที่เป็นกรดของคาร์บอน หมู่ฟังก์ชันนอล และพื้นที่ผิวของคาร์บอน



รูปที่ 2.7 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

ตารางที่ 2.6 แสดงความเป็นกรดของพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันนอล และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิด (Faust and Aly, 1987)

Sample	Base Consumption (Meq/100g)				Surface Groups (Meq/100g)				BET(N ₂) (m ² /g)
	NaOEt	NaOH	Na ₂ CO ₃	NaHCO ₃	IV	III	II	I	
LC325	59	48	28	30	11	20	-	30	1,076
LC325 O ^a	310	292	205	150	18	87	55	150	861
LC325 Or ^b	246	210	129	92	36	81	36	92	840
LC325 Od ^c	65	55	15	10	10	40	5	10	1,015
S51	108	71	48	40	37	23	8	40	586
S51 O	421	357	245	185	64	112	60	185	596
S51 OR	215	181	112	80	34	70	32	80	836
S51 OD	60	60	25	20	-	35	5	20	725
P607	265	203	132	109	62	71	23	109	646
P607 O	350	267	185	152	83	82	33	152	613
P607 OR	298	223	142	107	75	81	35	107	640

a = oxidized by (NH₄)₂S₂O₈

b = oxidized followed by reduction with hydrogen at room temperature

c = oxidized followed by vacuum outgasing at 890 °C

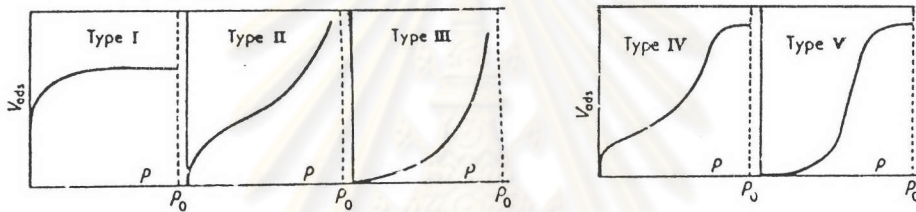
จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้ในการเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะกับการใช้งาน ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนซึ่งมีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์มีขั้ว (Polar Organic) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีออกซิเจนบนพื้นผิว สามารถใช้ในการกำจัดโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) Coughlin และ Tan (1968, Semmens, Norgaad, Hohenstein and Staples, 1986) ได้แสดงให้เห็นว่า หมู่ฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีผลกระทบอย่างมากต่อความจุของการดูดซับ เช่น กลุ่มฟังก์ชันนอล Carboxylic ทำให้ความจุของการดูดซับฟีนอลลดลง เป็นต้น

2.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

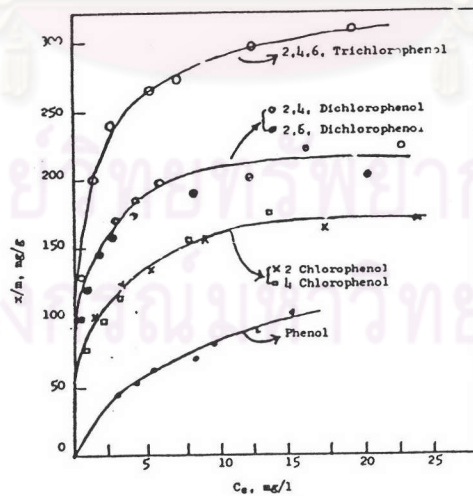
การดูดซับจากสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็ง ในขณะที่เกิดการดูดซับขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ มีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายเมื่ออัตราการดูดซับ และอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium State) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น

ของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย พืเอช อุณหภูมิ และอื่น ๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารดูดซับบนพื้นผิวสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจากไอโซเทอมรูปที่ I เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น ส่วนรูปที่ 2.9 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของสารประกอบฟีนอลิกบนถ่านกัมมันต์จากของเหลว



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust and Aly, 1987)



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดซับของสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) บนถ่านกัมมันต์จากของเหลว (Faust and Aly, 1987)

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับ ซึ่ง
เป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎี และผลจากการทดลอง ซึ่งรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

2.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model
คือ

1. โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียว
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดซับ ของไอโซเทอมการดูดซับ
แบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ (2.5)

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มี
หน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ ที่ใช้ในการ
สร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (2.5) เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์ (Infinity) สมการที่ (2.5)
สามารถเขียนได้เป็น

$$C_e / X = (1/b X_m) + (C_e / X_m) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/X กับ C_e จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/X_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/bX_m$ สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ C_e ไปหารสมการที่ (2.6) จะได้สมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/bX_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m$ รูปที่ 2.10 เป็นกราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

2.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET, Brunauer Emmerett - Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อ ๆ ไป สมการการดูดซับแบบเบท แสดงในสมการที่ (2.8)

$$X = (X_m B C_e) / (C_e - C_e) [1 + (B-1)C_e/C_e] \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

C_s = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

B = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

สมการที่ (2.8) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e/X(C_s - C_e) = (1/X_m B) + [(B-1)/X_m B](C_e/C_s) \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/X(C_s - C_e)$ กับ C_e/C_s จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(B-1)/X_m B$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m B$ กราฟของสมการการดูดซับแบบเบทแสดงในรูปที่ (2.10)

2.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x/m = K C_e^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

โดยที่ x = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ มีหน่วยเป็น mg หรือ mol/l

m = น้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น g

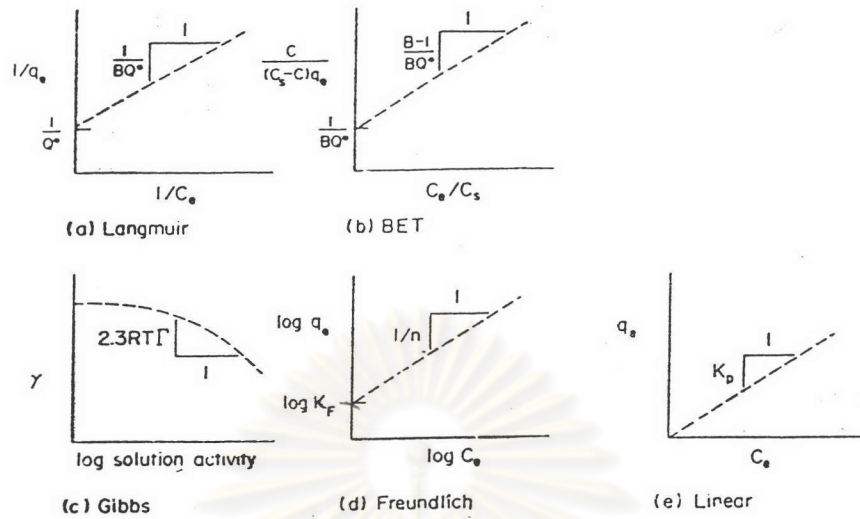
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l

$K, 1/n$ = ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการฟรุนดลิชเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\log(x/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(x/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ เมื่อ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงดังรูปที่ 2.10 ค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า $1/n$ ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี



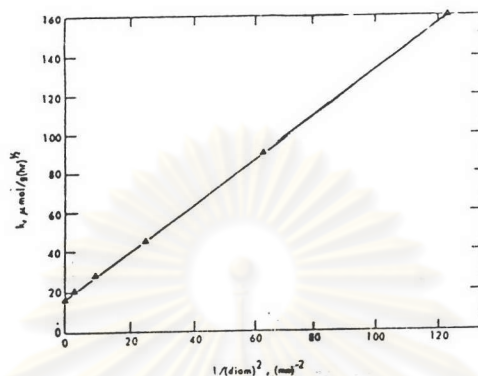
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่าง ๆ (Voice and Weber, 1983)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (Factors Influencing Adsorption)

2.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ Diamadopoulos และคณะ (1993) ได้ศึกษาการดูดติดผิวของฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์ พบว่า ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดติดมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถึง 3.5 เท่า Mathews และ Zayas (1989) กล่าวว่า สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลภายนอกประมาณได้ว่าคงที่สำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 300 μm ถึง 900 μm (50/70 ขนาดตะแกรงมาตรฐานถึง 20/25 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน) สำหรับการวัดค่าจากพื้นที่ผิวเท่ากัน และจะลดลงเมื่อเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลาง

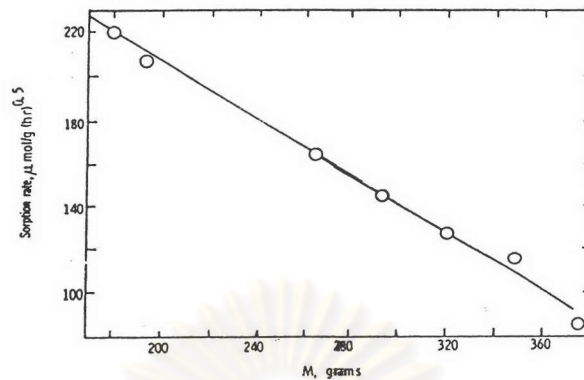
กลางของคาร์บอน Randtke และ Snoeyink (1983) กล่าวว่า ความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์เม็ด จะมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของเม็ดถ่านกัมมันต์ ดังรูปที่ 2.11



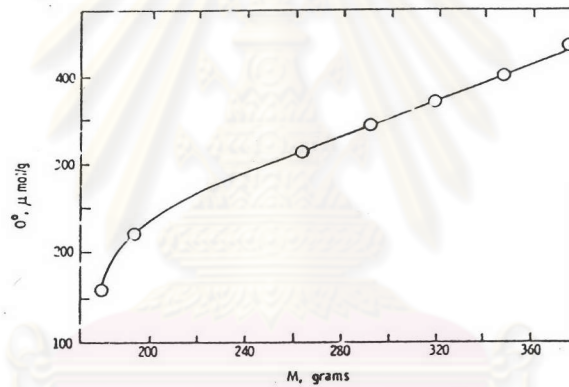
รูปที่ 2.11 แสดงผลของขนาดของถ่านกัมมันต์ที่มีต่ออัตราการดูดซับ (Faust and Aly, 1987)

2.5.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Nature of Adsorbate)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวของพันธะถูกโซ่ยาวขึ้น (Wang, Leonard, Wang and Goupil, 1975) นอกจากนี้ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วนรูปที่ 2.13 แสดงผลของน้ำหนักโมเลกุลที่มีต่อการดูดซับ



รูปที่ 2.12 ผลของน้ำหนักของโมเลกุลที่มีต่ออัตราการดูดซับ (Weber, 1972)



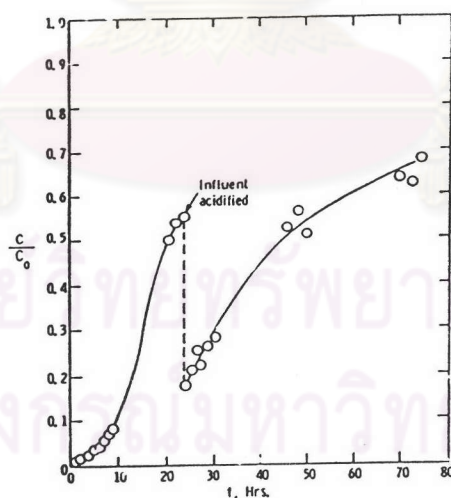
รูปที่ 2.13 ผลของน้ำหนักของโมเลกุลที่มีต่อความจุการดูดซับ (Weber, 1972)

Handshaw (1972) กล่าวเพิ่มเติมว่า ถ่านกัมมันต์มีสัมพรรคภาพ (Affinity) ในการดูดซับของโมเลกุลสารอินทรีย์ไม่มีขั้วจากตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ เป็นต้น Bernardin (1976) กล่าวว่า ปัจจัยที่สำคัญ 3 อย่างที่มีผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ คือ โพลาลิตี (Polarity) โครงสร้างของโมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ โมเลกุลที่มีโพลาลิตีสูงสามารถที่จะละลายน้ำได้ดีทำให้ยากต่อการดูดซับ โครงสร้างของโมเลกุลมีผลต่อพื้นที่ผิวที่ยึดติดบนผิวคาร์บอน เช่น วงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Rings) ทำให้การดูดซับดีขึ้น น้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อการดูดซับเนื่องมาจากผล 2 ประการ คือ ความสามารถในการละลายและแรงดึงดูดที่พื้นผิว สารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ โดยทั่วไปจะละลายน้ำได้น้อยและมีแรงดึงดูดสูง จึงสามารถที่จะดูดซับได้

ง่าย อย่างไรก็ตามกฎเหล่านี้จะใช้ได้สำหรับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของคาร์บอน ขนาดของรูพรุนของผิวคาร์บอนจะอยู่ระหว่าง 10 \AA ถึง 1000 \AA ดังนั้นโมเลกุลที่ใหญ่กว่า 1000 \AA จะไม่สามารถดูดซับได้

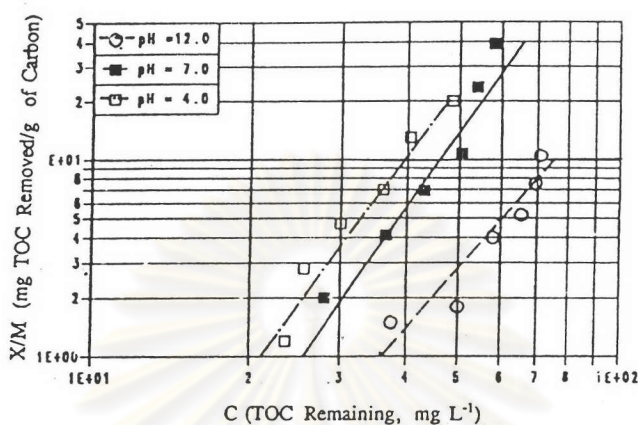
2.5.3 พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดซับผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดซับผิวของไอออนอื่น ๆ มีผลมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบ ที่เป็นกรดหรือเบส ในการดูดซับผิว โดยทั่วไปแล้วการดูดซับผิวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ตัวอย่างของพีเอชที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับผิว แสดงดังรูปที่ 2.14 จากรูปเป็นการดูดซับผิวของสารละลาย Sulfonate Alkylbenzene ในถังดูดซับผิวแบบแท่ง โดยป้อนสารละลายที่มีพีเอชเป็นกลางเข้าสู่ระบบจนกระทั่งอัตราส่วนของสารในน้ำเข้าและน้ำออกเท่ากับ 0.55 ที่จุดนี้ จะทำการปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเป็น 2.5 ผลจากการลดพีเอชทำให้การดูดซับผิวเพิ่มขึ้น และลดปริมาณความเข้มข้นของสารในน้ำออกอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.14 ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับผิวด้วยถ่านกัมมันต์ในถังดูดซับผิวแบบแท่ง (Weber, 1972)

Farooq และ Misbahuddin (1991) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พบว่าเมื่อพีเอชลดลงปริมาณของทีโอซี (TOC) ที่ถูกดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดทีโอซีโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Farooq and Misbahuddin, 1991)

2.5.4 อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบมากนักต่อกระบวนการดูดซับ ตารางที่ 2.7 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของสีย้อมผ้า

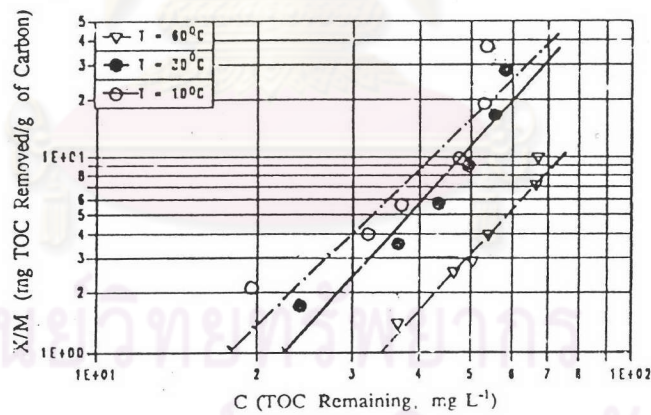
ตารางที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของสีย้อมผ้า (Hassler, 1963)

Carbon Code	Dye	Millmoles dye adsorbed per gram carbon in 60 minutes	
		25° C	80° C
G	Methylene Blue	0.83	0.85
H		0.37	0.39
J		0.46	0.56

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

Carbon Code	Dye	Millimoles dye adsorbed per gram carbon in 60 minutes	
		25° C	30° C
G	Malachite Green	1.07	1.08
H		0.45	0.53
J		0.30	0.42
G	Alizarin Red	1.25	1.15
H		0.60	0.55
J		0.56	0.66

Farooq และ Misbahuddin (1991) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับสีฟิว ดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่าการกำจัดที่โอซีเพิ่มขึ้นจาก 49 เปอร์เซ็นต์ เป็น 73 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ อุณหภูมิเปลี่ยนจาก 60 °C เป็น 10 °C



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิในการลดปริมาณที่โอซีโดยการดูดซับสีฟิว (Farooq and Misbahuddin, 1991)

2.5.5 ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ Chang (1991) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียม (Cd) และ ตะกั่ว (Pb) พบว่าเมื่อเพิ่มความปั่นป่วนของระบบความสามารถในการกำจัดโลหะทั้ง 2 ชนิดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ผลของความปั่นป่วนที่มีต่อการกำจัดแคดเมียมและตะกั่ว (Chang, 1991)

RPM	Cd residual (mg/l)	Cd removal (%)	Pb residual (mg/l)	Pb removal (%)
0	5.000	-	5.000	-
50	2.777	44.5	0.680	86.4
100	0.416	91.7	0.600	88.0
150	0.283	94.3	0.365	92.7
200	0.219	95.6	0.310	93.8
250	0.174	96.5	0.269	94.6

PAC Dosage : 10 g/l , Contact Time : 10 min

2.5.6 เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของถังดูดซับแบบแห้ง Symons และคณะ (1975, Lee et al., 1981) ได้รายงานว่าการสัมผัสถึงเปล่าของถังดูดซับที่ยาวนาน และปริมาณของสารในน้ำเข้าที่มีจำนวนน้อย ๆ จะมีอายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนนานขึ้น Cheremisinoff และคณะ (1976) แนะนำไว้ว่าเพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าการดูด

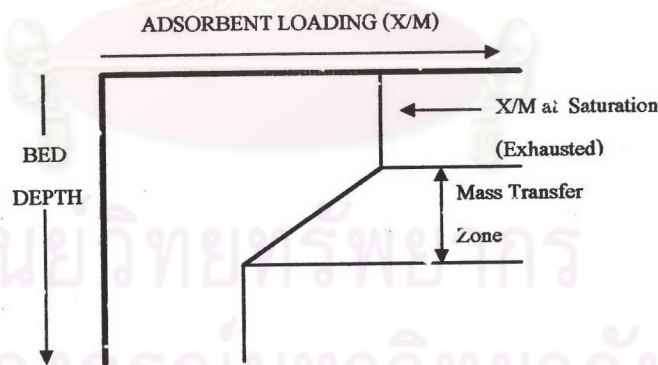
ติดผิวของสารแปลกปลอมในน้ำเป็นไปอย่างเหมาะสม สารละลายควรจะมีเวลาที่เก็บกักในชั้นของคาร์บอนนานประมาณ 30 นาที

2.6 ถังดูดติดผิวแบบแท่ง (The Adsorption Column)

ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง คาร์บอนจะถูกใส่ไว้ในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวซึ่งมีสารดูดติดผิวไหลผ่านชั้นผ่านชั้นของคาร์บอน โดยเป็นการป้อนอย่างต่อเนื่อง Weber (1972) กล่าวว่า ถังดูดติดผิวแบบแท่งมีข้อดีเหนือกว่าการใช้ถังดูดติดผิวแบบแบตช์ (Batch) คือ อัตราการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะต่ำลงตามชั้นของคาร์บอนในถังดูดติดผิวแบบแท่งอย่างต่อเนื่อง

2.6.1 เขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

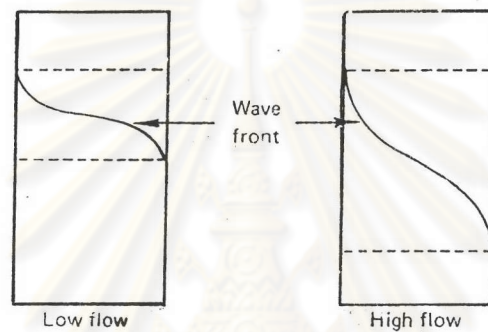
เมื่อน้ำที่มีสารปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของสารดูดติดผิว เขตการถ่ายเทมวลก็เกิดขึ้นจากการดูดติดผิวอย่างต่อเนื่องของตัวถูกละลายในชั้นคาร์บอน รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของสารดูดติดผิว กับความลึกของชั้นคาร์บอน



รูปที่ 2.17 เขตการถ่ายเทมวลในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Faust and Aly, 1987)

ตัวถูกละลายจะถูกดูดติดผิวอย่างรวดเร็วในชั้นบนของชั้นคาร์บอน จนกระทั่งปริมาณการดูดติดผิวเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารดูดติดผิวที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดติดผิวก็จะเกิดขึ้นต่อไปในชั้นคาร์บอนที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูก

จุดคิดผิวนี้ เราเรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของสารถูกดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับ และปัจจัยทางศาสตร์ Bernardin (1976) กล่าวว่า เมื่อสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นคาร์บอนด้วยอัตราการไหลที่เร็ว จะทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออก ขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางตรงข้ามหากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นของคาร์บอนอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ในกรณีนี้ คาร์บอนจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

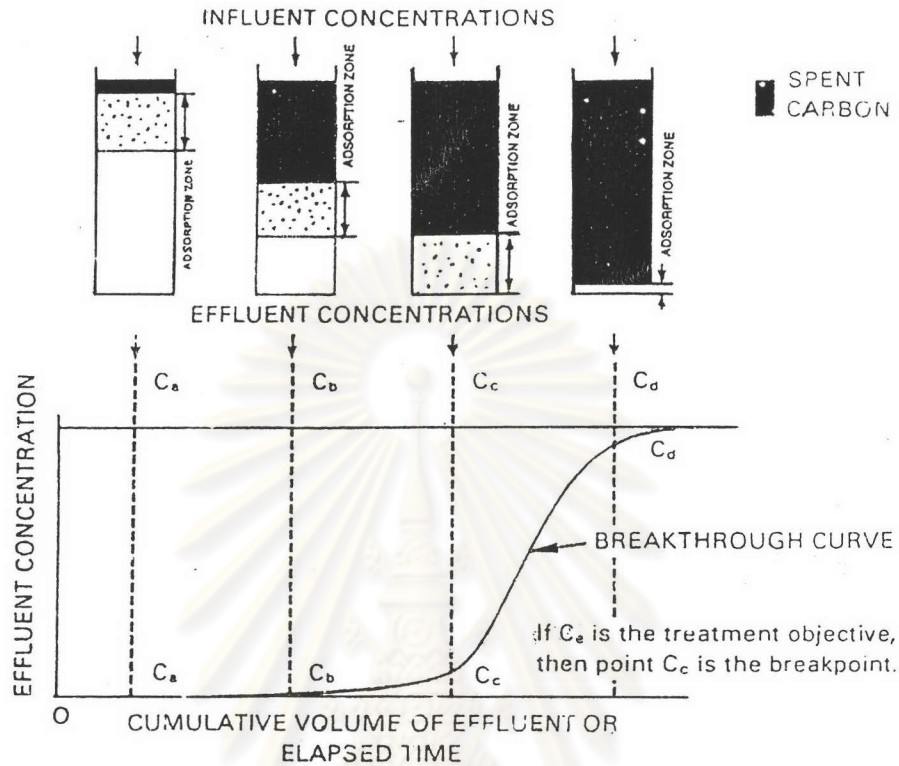


รูปที่ 2.18 เขตการถ่ายเทมวลของอัตราการไหลที่ต่างกัน (Bernardin, 1976)

2.6.2 ลักษณะเบรคทรูจ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทรูจเป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง ของความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังรูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทรูจ และแสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งเบรคทรูจกับปริมาณของชั้นถ่านที่หมดสภาพ ชั้นของถ่านที่ยังไวงานอยู่ (Active Zone) และชั้นของถ่านที่ปราศจากสารถูกดูดซับ

จากรูปที่จุดเริ่มต้น น้ำที่ผ่านออกจากถังดูดซับแบบแท่งจะมีปริมาณตัวถูกละลายต่ำ ตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยคาร์บอนในชั้นต้น ๆ ของถัง เมื่อของเหลวไหลผ่านถึงเป็นจำนวนมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้ปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งชั้นของคาร์บอนในถังใกล้จะหมดสภาพ ปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำเข้า

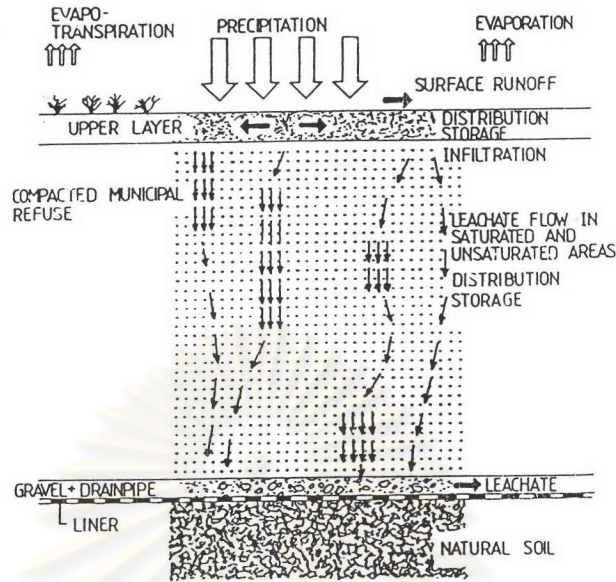


รูปที่ 2.19 แสดงเส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Clark and Lykins, 1989)

2.7 น้ำชะมูลฝอย (Leachate)

2.7.1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย (Leachate Generation)

น้ำชะมูลฝอยเกิดจากของเหลวที่ซึมผ่านชั้นมูลฝอยในหลุมฝังกลบมูลฝอย แล้วชะละลายเอาสารละลาย หรือสารแขวนลอยต่าง ๆ ออกมาจากของเหลวนั้น ซึ่งของเหลวที่ซึมผ่านลงมาในส่วนใหญ่จะเป็นน้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบ รูปที่ 2.20 แสดงแหล่งที่มาของน้ำที่หลุมฝังกลบมูลฝอย (Dass, Tamke and Stoffel, 1977 ; Alesii and Carter, 1979 ; Lema et al., 1988 ; Tchobanoglous et al., 1993)



รูปที่ 2.20 แหล่งที่มาของน้ำบริเวณหลุมฝังกลบมูลฝอย (Lema et al., 1988)

น้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบส่วนหนึ่งจะกลายเป็นน้ำที่ผิวดิน (Surface Runoff) ภายหลังจากที่ผ่านการระเหย การคายน้ำของดินและพืช ส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักไว้ในชั้นดินจนกระทั่งความชื้นที่สะสมในชั้นดินเกินความจุสนาม (Field Capacity) ของดิน น้ำจะซึมลงสู่ชั้นของขยะมูลฝอย ของเหลวที่ซึมลงมานี้จะสะสมอยู่ในชั้นของขยะมูลฝอย จนกระทั่งถึงค่าความจุสนามของมูลฝอย น้ำเหล่านี้จะชะละลายสารต่างๆออกจากมูลฝอย และซึมลงไปสะสมตัวที่พื้นข้างใต้หลุมฝังกลบ เรียกว่า น้ำชะมูลฝอย (Leachate) (Dass et al., 1977) นอกจากนี้แหล่งที่มาของของเหลวที่ทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยยังมาจากแหล่งอื่น ๆ ได้อีก เช่น น้ำใต้ดิน น้ำพุใต้ดิน และของเหลวที่ถูกผลิตขึ้นจากการย่อยสลายของมูลฝอย (Tchobanoglous et al., 1993)

2.7.2 องค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย (Composition of Leachate)

น้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบมูลฝอยจะประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ มากมาย ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดมลพิษขึ้นได้ Johansen และ Carlson (1976) กล่าวว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อส่วนประกอบและปริมาณของน้ำชะมูลฝอย คือ ส่วนประกอบของมูลฝอย การจัดการในการฝังกลบ ภูมิอากาศ สภาพทางอุทกศาสตร์ของหลุมฝังกลบ และสภาวะต่าง ๆ ภายในหลุมฝังกลบ เช่น กระบวนการทางชีวภาพ

และเคมี ความชื้น อุณหภูมิ พีเอช และอายุของหลุมฝังกลบ นอกจากนี้ Fuller และ คณะ (1979) กล่าวเพิ่มเติมว่า ปัจจัยที่เด่นชัดที่ทำให้เกิดความแตกต่างขององค์ประกอบน้ำชะมูลฝอย เป็นผลมาจาก ลักษณะของมูลฝอย ลักษณะทางกายภาพของมูลฝอย เช่น การบดมูลฝอยให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เป็นต้น การบดอัดมูลฝอย ปริมาณความชื้นในมูลฝอย อุณหภูมิ ธรรมชาติของหลุมฝังกลบ อายุของน้ำชะมูลฝอย วิธีการเก็บตัวอย่าง และวิธีที่ใช้วัดตัวอย่าง ตารางที่ 2.9 และ 2.10 แสดงถึงองค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอยจากแหล่งที่พักอาศัย ในประเทศสหรัฐอเมริกา และในกรุงเทพมหานคร

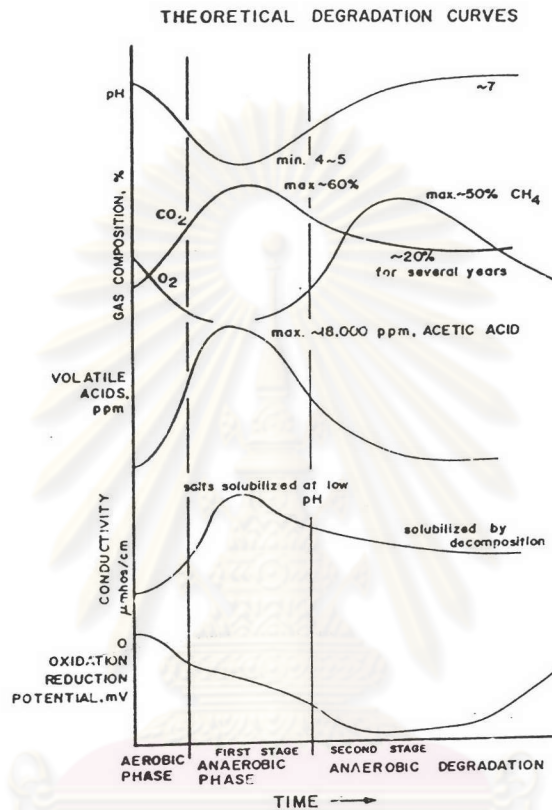
ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางกายภาพของขยะมูลฝอยจากแหล่งที่พักอาศัยในประเทศสหรัฐอเมริกา (Tchobanoglous et al., 1993)

Component	Percent by weight			
	United States ^a		Packaging materials ^c	Davis, California ^d
	Range	Typical ^b		
Organic				
Food wastes	6-18	9.0	-	6.0
Paper	25-40	34.0	50-60	33.1
Cardboard	3-10	6.0	12-16	7.9
Plastics	4-10	7.0	-	10.7
Textiles	0-4	2.0	-	2.4
Rubber	0-2	0.5	-	2.5
Leather	0-2	0.5	-	0.1
Yard wastes	5-20	18.5	-	17.7
Wood	1-4	2.0	4-8	5.0
Misc. organics	-	-	-	0.4
Inorganic				
Glass	4-12	8.0	20-30	5.8
Tin cans	2-8	6.0	6-8	3.9
Aluminium	0-1	0.5	2-4	0.4
Other metal	1-4	3.0	-	3.6
Dirt, ash, etc.	0-6	3.0	-	0.5
Total		100.0		100.0

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบของมูลฝอยในกรุงเทพมหานครระหว่างปี 2529-2537 (สำนักรักษาความสะอาด, กรุงเทพมหานคร, 2538)

องค์ประกอบทางกายภาพ	ปริมาณองค์ประกอบ (% โดยน้ำหนัก)								
	2529	2531	2532	2533	2534	2535	2536	2537	เฉลี่ย
ประเภทเผาไหม้ได้	60.61	56.07	61.75	56.06	63.91	63.37	59.30	59.52	60.07
กระดาษ	18.62	14.21	15.71	14.95	19.23	10.80	15.40	13.99	15.36
ผ้าและสิ่งทอ	10.23	1.99	6.11	5.44	5.53	4.15	4.50	3.49	5.18
พลาสติก	13.09	12.77	10.76	10.44	16.22	19.10	16.02	20.66	14.88
ใบไม้และไม้	8.50	11.95	10.18	7.05	4.78	7.06	4.24	5.89	7.45
ผักและผลไม้ (เศษอาหาร)	6.82	8.99	12.66	11.21	8.10	18.94	15.76	14.72	12.15
กระดุกและเปลือกหอย	3.01	4.69	5.62	4.13	4.97	1.66	1.21	0.62	3.23
หนังและยาง	0.35	1.47	0.71	2.84	5.28	1.66	2.17	0.15	1.82
ประเภทที่เผาไหม้ไม่ได้	14.79	14.20	15.13	16.84	14.20	14.54	7.78	7.75	13.15
เหล็กและโลหะอื่นๆ	3.27	3.63	3.63	3.78	4.98	1.66	2.52	2.00	3.15
แก้ว	2.84	8.37	4.79	7.18	4.52	10.80	4.65	4.64	6.00
หินและเซรามิก	8.68	2.21	6.71	5.88	4.70	2.08	0.61	1.11	4.00
ประเภทอื่นๆที่มีขนาดเล็กกว่า และใหญ่กว่า 5 มม.	24.60	29.74	23.12	27.10	21.89	22.09	32.92	32.73	26.78
รวม	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ขยะมูลฝอยเมื่อนำมาสู่หลุมฝังกลบเพื่อทำการกำจัดนั้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี กายภาพ และชีวภาพของมูลฝอยขึ้น มีผลทำให้น้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไป เนื่องจาก ความเข้มข้นของน้ำชะมูลฝอยมีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายของตัวมูลฝอยซึ่งมักจะเป็นกระบวนการย่อยทางสลายชีวภาพ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.21

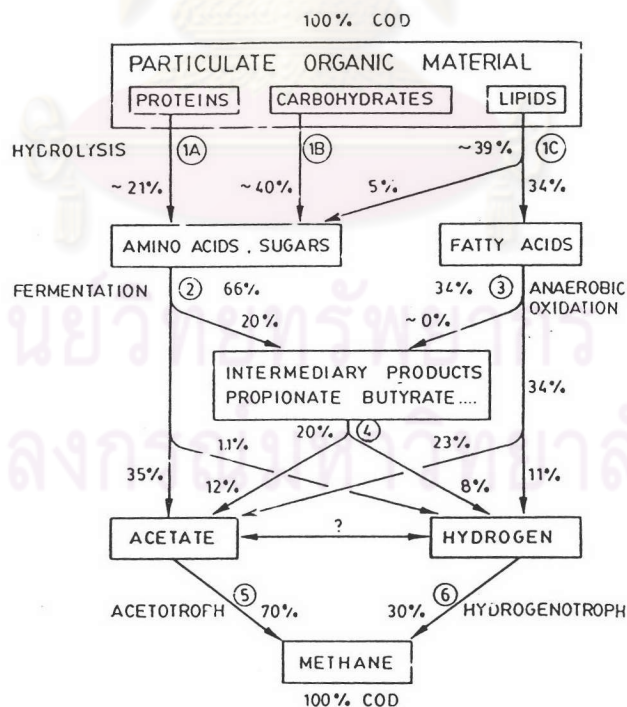


รูปที่ 2.21 กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ

(Stanforth, Ham, Anderson and Stegmann, 1979)

จุลชีพที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายมูลฝอยมี 3 กลุ่ม คือ แบคทีเรียใช้ออกซิเจน (Aerobic) แบคทีเรียเฟคัลเททีฟ (Facultative) และแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic) จากรูป 2.21 ในช่วงแรกจะเป็นการย่อยสลายที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นระยะเวลาช่วงสั้นๆ เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนมีจำนวนจำกัด และความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) ของมูลฝอยมีค่าสูงมาก ระหว่างช่วงนี้จะเกิดความร้อนสูง ทำให้อุณหภูมิของหลุมฝังกลบสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 120 ถึง 160 °F ซึ่งจะคงอยู่ประมาณ 2 ถึง 3 เดือนในหลุมฝังกลบ และอาจจะมีอุณหภูมิในหลุมฝังกลบสูงถึง 200 °F น้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะชะละลายเอาเกลือที่ละลายน้ำได้ออกมา เช่น โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น เมื่อออกซิเจนเริ่มหมดลง ทำให้แบคทีเรียเฟคัลเท

ที่ฟิเริ่มมีบทบาทมากขึ้น ซึ่งระยะนี้จะเป็นช่วงแรกของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน กรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid) เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) และคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกผลิตขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้ค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยมีค่าต่ำประมาณ 4 ถึง 5 ซึ่งจะช่วยให้สารอินทรีย์ละลายได้ง่าย ยิ่งปริมาณของกรดไขมันระเหยได้มากขึ้นเท่าไร ความเข้มข้นของไอออนก็จะเพิ่มขึ้นตาม จะพบว่าในช่วงนี้จะมีปริมาณความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (COD) สูง ศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจะมีค่าต่ำกว่า 0 mV ช่วงนี้เราเรียกว่า ช่วงสร้างกรด (Acid Production) อุณหภูมิของหลุมฝังกลบจะอยู่ระหว่าง 85 ถึง 110 °F และมีค่าสูงสุดประมาณ 125 °F ส่วนในช่วงที่สองของการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน จะมีการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น และอาจจะมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากกรดไขมันระเหยได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซต่าง ๆ โดยแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methane-producing Bacteria) ทำให้ความเข้มข้นของกรดลดลง ส่วนสารอินทรีย์บางชนิดยังสามารถจะละลายได้อยู่บ้าง ทำให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับกรดไขมันระเหยได้ การย่อยสลายทางชีววิทยาของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าแบคทีเรียใช้ออกซิเจน ซึ่งจะใช้เวลาหลายปีกว่าที่หลุมฝังกลบนั้นจะอยู่ในสภาพที่คงตัว รูปที่ 2.22 แสดงการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายในหลุมฝังกลบ และตารางที่ 2.11-2.13 แสดงลักษณะของน้ำชะมูลฝอย



รูปที่ 2.22 แสดงการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายในหลุมฝังกลบ (Lema et al., 1988)

ตารางที่ 2.11 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่าและใหม่ (Tchobanoglous et al., 1993)

Constituent	Value, mg/l ^b		
	New landfill (less than 2 years)		Mature landfill (greater than 10 years)
	Range ^c	Typical ^d	
BOD ₅	2,000-30,000	10,000	100-200
TOC	1,500-20,000	6,000	80-160
COD	3,000-60,000	18,000	100-500
Total suspended solids	200-2,000	500	100-400
Organic nitrogen	10-800	200	80-120
Ammonia nitrogen	10-800	200	20-40
Nitrate	5-40	25	5-10
Total phosphorus	5-100	30	5-10
Ortho phosphorus	4-80	20	4-8
Alkalinity as CaCO ₃	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Total hardness as CaCO ₃	300-10,000	3,500	200-500
Calcium	200-3,000	1,000	100-400
Magnesium	50-1,500	250	50-200
Potassium	200-1,000	300	50-400
Sodium	200-2,500	500	100-200
Chloride	200-3,000	500	100-400
Sulfate	50-1,000	300	20-50
Total iron	50-1,200	60	20-200

^b Except pH, which has no units

^c Representative range of values. Higher maximum values have been reported in the literature for some of the constituents.

^d Typical values for new landfills will vary with the metabolic state of landfill.

ตารางที่ 2.12 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากประเทศต่าง ๆ (Lema et al., 1988)

From	Age ^a	COD	BOD ₅	pH	TS	SS	VSS	TKN	N-NH ₃	P-PO ₄ (x 10 ³)	Reference
Lysimeter	Y	35.0	15.0	5.0	21.5	-	-	0.85	0.5	80.0	Cameron and Koch, 1980b
The Netherlands	Y	31.6	-	5.7	-	-	-	1.0	-	-	Bekker and Kaspers, 1981
The Netherlands	Y	25.0	-	5.7	-	-	-	0.7	-	-	Bekker and Kaspers, 1981
United Kingdom	Y	23.8	11.9	6.2	-	0.54	0.22	-	0.79	0.73	Robinson and Maris, 1985
France	Y	48.0	17.0	6.0	-	0.20	-	1.9	1.6	1.2	Millot et al., 1987
Canada	Y	13.8	9.7	5.8	12.7	-	-	-	0.04	-	Henry et al., 1987
Spain	Y	20.1/50.6	7.5/11.5	5.9/6.3	8.1/33.5	-	-	-	1.0/1.65	-	Contreras et al., 1988
Spain	Y	10.0	-	8.0	-	1.2	0.96	-	0.75	<1	Mendez et al., 1989
Lysimeter	MA	18.0	13.0	5.8	9.0	-	-	0.33	0.19	17.0	Cameron and Koch, 1980b
Canada	MA	3.8	1.1	6.4	5.3	2.39	1.24	-	0.03	-	Henry et al., 1987
Canada	MA	1.2	0.37	7.9	-	-	-	-	0.07	-	Kelly, 1987
Spain	MA	22.0	-	8.0	-	0.4/5	0.2/2	-	3.0	<1	Lema et al., 1987E
United Kingdom	O	0.67	0.07	7.5	-	-	-	-	0.26	0.54	Robinson, 1983
United Kingdom	O	1.2	0.26	7.5	-	0.10	0.06	-	0.37	4.2	Robinson and Maris, 1985
Canada	O	1.9	0.9	6.6	3.1	2.98	-	-	0.01	-	Henry et al., 1987
France	O	1.4	0.07	8.3	-	0.17	-	0.59	0.5	-	Millot et al., 1987
Spain	O	1.1/7.1	0.08/0.5	6.9/8.3	4.3/98	-	-	-	0.9/2.1	-	Contreras et al., 1988
Spain	O	1.2	-	7.6	-	0.35	0.28	-	0.27	<0.5	Mendez et al., 1989
Lysimeter	-	40.0	15.4	5.3	-	-	-	0.82	0.64	14.8	Pohland, 1980
Lysimeter	-	13.0	8.1	5.4	6.9	0.46	0.28	0.17	0.13	16.0	Wong and Mavinic, 1982
Brazil	-	18.1	11.0	6.6	14.4	10.8	-	0.71	0.55	22.7	Veit et al., 1983
Brazil	-	7.2	3.7	7.2	16.6	15.0	-	1.0	0.88	-	Veit et al., 1983
U.S.A. (Range)	-	0.04/90	0.08/33	3.7/8.5	0/6	0.01/0.7	-	-	0.0/1.0	6.5/85	Gould and Ramsey, 1983
U.S.A./Italy (Range)	-	3.0/45	2.0/30	5.3/8.5	0.2/1.0	-	-	-	0.01/0.8	5.3/50	Cossu, 1982

^a Y = young; MA = medium age; O = old, All values except pH in g/l.

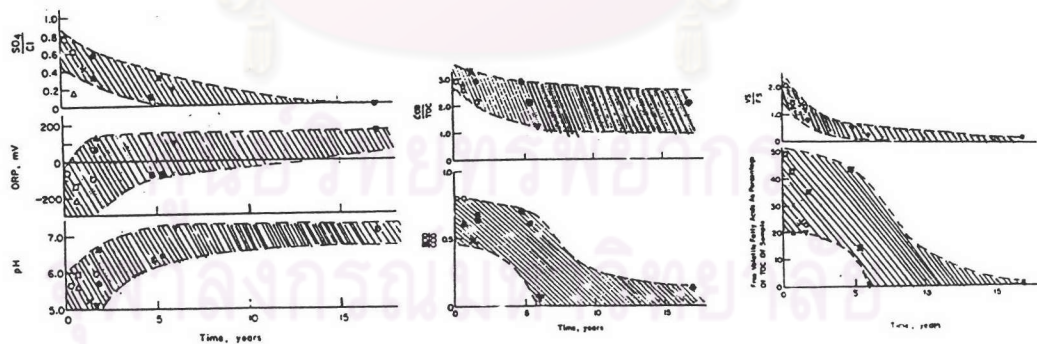
ตารางที่ 2.13 ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากประเทศต่าง ๆ (Lema et al., 1988)

From	Age ^a	Zn	Mn	Ni	Cr	Cu	Pb	Cd	Reference
Lysimeter	Y	170	24.0	0.42	8.40	0.08	1.6	0.45	Cameron and Koch, 1980b
The Netherlands	Y	26.0	-	0.43	0.32	0.30	0.12	0.02	Bekker and Kaspers, 1981
United Kingdom	Y	21.5	26.5	0.57	0.56	0.12	0.40	0.03	Robinson and Maris, 1985
France	Y	34.2	38.5	6.11	-	0.15	0.92	-	Millot et al., 1987
Canada	Y	5.04	-	1.08	-	0.19	-	0.10	Henry et al., 1987
Spain	Y	0.53/1.4	4.8/7.6	0.3/0.5	0.13/0.57	0.08/0.19	0.05/0.45	-	Contreras et al., 1988
Lysimeter	MA	38.0	10.0	0.02	0.20	0.05	0.04	0.08	Cameron and Koch, 1980b
Canada	MA	0.22	-	0.01	-	0.11	-	0.02	Henry et al., 1987
Canada	MA	0.18	3.24	-	0.12	0.02	0.08	0.02	Kelly, 1987
United Kingdom	O	0.37	2.15	0.09	0.04	0.03	0.14	0.01	Robinson and Maris, 1985
Canada	O	0.19	-	-	-	0.05	-	0.01	Henry et al., 1987
France	O	0.22	0.45	0.18	-	0.12	0.01	-	Millot et al., 1987
Spain	O	0.24/0.56	0.05/0.4	0.47/0.5	0.17/0.23	0.1/0.14	0.07/0.17	-	Contreras et al., 1988
Lysimeter	-	2.65	74.0	2.0	0.40	-	-	0.20	Pohland, 1980
Lysimeter	-	27.0	9.5	0.08	0.08	-	0.03	0.22	Wong and Mavinic, 1982
Brazil	-	10.4	15.2	-	0.75	0.29	0.68	0.06	Veit et al., 1983
Brazil	-	6.3	2.4	-	0.41	0.14	0.58	-	Veit et al., 1983
U.S.A. (Range)	-	0.0/370	0.1/125	-	-	0.0/10	0.1/2.0	0.03/17	Gould and Ramsey, 1983
U.S.A./Italy (Range)	-	1.0/135	-	-	-	1.0/9.0	0.0/2.0	0.0/0.05	Cossu, 1982

^a Y : young; O : old; MA : medium age

All values in mg/l

โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ในน้ำชะมูลฝอยมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในแต่ละวัน ดังนั้นจะเป็นการง่ายขึ้นถ้าใช้อัตราส่วนของพารามิเตอร์ที่ต่างกันในการแสดงค่าซึ่งจะมีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนทางเคมี เช่น COD/TOC BOD/TOC VS/FS และ SO₄/Cl จะแสดงถึงส่วนประกอบของน้ำชะมูลฝอยกับความสัมพันธ์ของอายุหลุมฝังกลบได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.23 อัตราส่วนของ COD/TOC มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออายุของหลุมฝังกลบเพิ่มขึ้น อัตราส่วนนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.3 สำหรับหลุมฝังกลบใหม่ถึง 1.16 สำหรับหลุมฝังกลบเก่า ค่าที่สูงที่สุดประมาณ 4 และค่าที่ต่ำสุด คือ 1.3 การลดลงของอัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงการออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น สารอินทรีย์เหล่านี้เป็นผลผลิตของการย่อยสลายทางชีววิทยา และจะเพิ่มจำนวนขึ้นตามอายุของหลุมฝังกลบ เมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์มากขึ้นทำให้น้ำชะมูลฝอยไม่เหมาะที่จะกำจัดด้วยวิธีการทางชีววิทยา ค่า COD/BOD ลดลงเมื่ออายุของหลุมฝังกลบมากขึ้น อัตราส่วนของ BOD/COD ลดลงจาก 0.47 ไปเป็น 0.07 ภายในเวลา 23 ปี ในการย่อยสลายทางชีวภาพ สารประกอบอินทรีย์จะลดลงเร็วกว่าสารอนินทรีย์เมื่ออายุของหลุมฝังกลบมากขึ้น สารอนินทรีย์จะลดลงเนื่องจากการชะของน้ำฝนที่ซึมผ่าน อัตราส่วนของแฉ่งระเหยทั้งหมดต่อของแฉ่งคงตัวทั้งหมด (VS/VF) ลดลงตามอายุของสถานที่ฝังกลบโดยลดลงจาก 2 สำหรับสถานที่ฝังกลบใหม่เป็น 0.2-0.25 สำหรับสถานที่ฝังกลบเก่า นอกจากนี้ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของหลุมฝังกลบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของ BOD/COD, COD/TOC, VS/FS, พีเอช, ORP และ SO₄/Cl ในน้ำชะมูลฝอยกับอายุของหลุมฝังกลบ (Chain and DeWalle, 1976)

2.7.3 วิธีการบำบัดน้ำชะมูลฝอย (Treatment of Leachate)

วิธีที่ใช้ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำชะมูลฝอย และอายุของหลุมฝังกลบ ซึ่งจะใช้เป็นข้อกำหนดพื้นฐานในการเลือกวิธีบำบัดที่เหมาะสม Johansen และ Carlson (1976) กล่าวว่า น้ำชะมูลฝอยที่มีความเข้มข้นสูงจะมีปริมาณกรดอินทรีย์มากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของสารอินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการบำบัดด้วยวิธีทางชีววิทยา Chain และ DeWalle (1976) กล่าวว่า น้ำชะมูลฝอยที่มาจากหลุมฝังกลบใหม่มีปริมาณของสารอินทรีย์สูงซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันระเหยได้ สามารถที่จะย่อยสลายได้เร็วด้วยกระบวนการทางชีววิทยา ส่วนน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่าจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ และสารที่ถูกขับออกมาจากกระบวนการย่อยของแบคทีเรียใน 2 เฟสสุดท้าย ควรจะใช้วิธีการบำบัดทางกายภาพเคมี นอกจากนี้ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่า การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ ให้ผลในการกำจัดสารอินทรีย์ดีกว่าการตกผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation) ตารางที่ 2.14 แสดงประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการชีวภาพ ส่วนตารางที่ 2.15 แสดงประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการต่าง ๆ ของกระบวนการทางกายภาพเคมี และตารางที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน COD/TOC BOD/COD และอายุของหลุมฝังกลบเพื่อเลือกวิธีการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอย

ตารางที่ 2.14 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางชีววิทยา (Chain and DeWalle, 1976)

Biological process	Author	Initial COD (mg/l)	BOD/COD	TOD/TOC	Treatment System	% COD removal	Detention time
Aerobic	Boyle and Ham (5)	8,800	0.80	-	Aerated Lagoon	74	5 d
	Cook and Foree (19)	15,800	0.45	3.45	Aerated Lagoon	98	10 d
	Karr (28)	3,550	0.64	3.20	Aerated Lagoon	77	0.6 d
	Pohland and Kay (37)	500	0.52	1.56	Aerated Lagoon	58	0.3 d
	Roy Weston Inc.	139	0.03	2.1	Aerated Lagoon	0	7.7 d
	This study	30,000	0.65	2.9	Aerated Lagoon	99	7 d
Anaerobic	Boyle and Ham (5)	10,600	0.79	-	Anaerobic digester	93	10 d
	Foree and Reid (20)	12,900	0.45	2.81	Anaerobic digester	92	10 d
	Karr (28)	16,500	0.62	2.92	Anaerobic digester	99	15 d

ตารางที่ 2.14 (ต่อ)

Biological process	Author	Initial COD (mg/l)	BOD/COD	TOD/TOC	Treatment System	% COD removal	Detention time
Anaerobic	Rogers (44)	5,500	0.78	2.82	Anaerobic digester	93	10 d
		1,300	0.81	-	Anaerobic filter using lime treated leachate	87	1.2 d
	This study	30,000	0.65	2.90	Anaerobic filter	97	27 d
Aerobic/ Anaerobic	Boyle and Ham (5)	-	0.18	-	Aerated Lagoon treatment of anaerobic digester effluent	40	5 d
	Foree and Reed (20)	510	-	2.53	Aerated Lagoon treatment of anaerobic digester effluent	22	1 d
	This study	1,000	-	2.35	Aerated Lagoon treatment of anaerobic digester effluent	17	7 d

ตารางที่ 2.15 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางกายภาพเคมี (Chain and DeWalle, 1976)

Treatment process	Author	Initial COD (mg/l)	BOD/COD	COD/TOC	Treatment system	% COD removal	Dosages
Chemical Precipitation	Cook and Foree (15)	14,900	0.45	3.45	Lime	13	2,760 mg/l Ca(OH) ₂
	Ho, et al. (24)	9,100	0.75	-	Ferric chloride	16.3	1,060 mg/l
		9,100	0.75	-	Alum	5.3	1,000 mg/l
		10,800	0.74	-	Lime	3.5	1,840 mg/l
		558	0.27	-	Lime treatment of anaerobic digester effluent	7.7	2,700 mg/l
		366	0.11	-	Lime treatment of anaerobic digester effluent polished by aerated lagoon	29	1,400 mg/l

ตารางที่ 2.15 (ต่อ)

Treatment process	Author	Initial COD (mg/l)	BOD/COD	COD/TOC	Treatment system	% COD removal	Dosages
Chemical Precipitation	Karr (28)	4,800	0.66	2.73	Alum and lime	40	2,250 mg/l
					Ferrosulfate	13	2,500 mg/l $FeSO_4 \cdot 7H_2O$
	Roy Weston Inc.	139	0.04	2.1	Lime	0	1,000 mg/l
	Rogers (44)	3,400	0.81	-	Lime	0	1,000 mg/l
	Simensen and Odegaard (45)	1,240	0.66	2.78	Lime and Aeration	8	210 ml saturated lime/ l leachate
		1,234	0.68	2.88	Iron and Aeration	0	200 mg/l $FeCl_3$
		1,234	0.68	2.88	Alum and Aeration	11	180 mg/l $Al_2(SO_4)_3$
	Thornton and Blanc (50)	5,033	0.60	-	Lime	24	1,350 mg/l
	Van Fleet et al. (51)	2,000	0.36	-	Alum	31	2,700 mg/l
This study	2,820	0.65	2.89	Lime	26	450 mg/l	
Activated Carbon and Ion Exchange Adsorption	Cook and Forec (15)	330	0.07	2.57	Activated carbon batch treatment of aerated lagoon effluent	70	-
		3,290	0.45	3.45	Activated carbon column treatment of lime pretreated leachate	81	15 min HRT after initial volume turnovers
	Ho, et al. (24)	4,290	0.75	-	Activated carbon, batch	34	16,000 mg/l
					7,213	0.75	-
	Karr (27)	5,500	0.66	2.73	Activated carbon, batch	60	160,000 mg/l
	Pohland and Kang (38)	184	0.18	1.5	Carbon batch treatment of activated sludge effluent	91	10,000 mg/l
					120	0.18	1.5
	Roy Weston Inc.	127	0.04	2.1	Activated carbon, batch	85	10,000 mg/l
	Van Fleet, et al. (51)	2,000	0.36	-	Activated carbon column treatment of leachate	71	
This study	632	0.65	2.89	Activated carbon column treatment of alum pretreated leachate	94		
				Activated carbon column treatment of leachate	70 decreased to 13 after 140 BV		

ตารางที่ 2.15 (ต่อ)

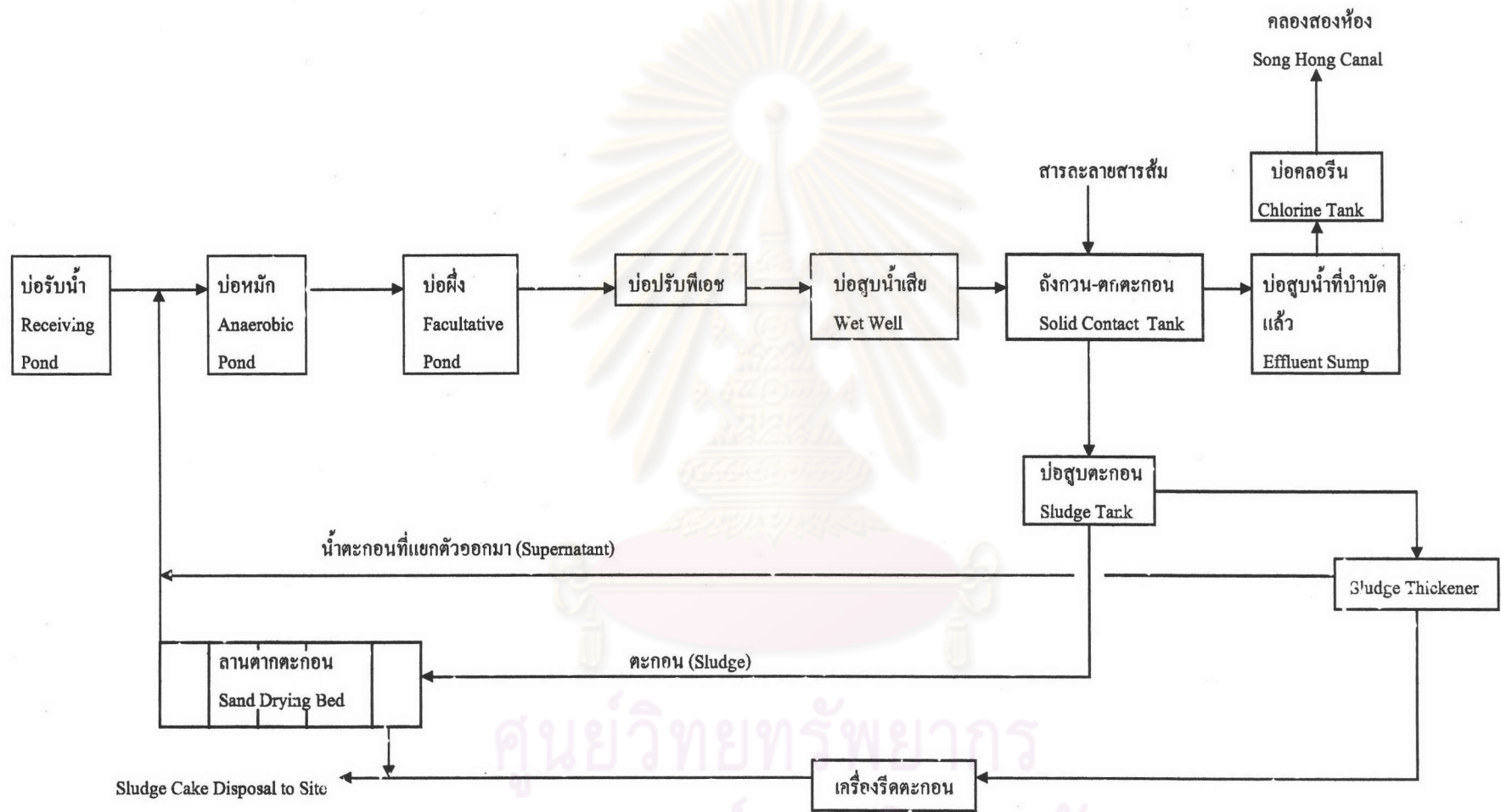
Treatment process	Author	Initial COD (mg/l)	BOD/COD	COD/TOC	Treatment system	% COD removal	Dosages
Activated Carbon and Ion Exchange Adsorption	This study	546	<0.1	2.55	Activated carbon column treatment of effluent of aerated lagoon	70	
		527	<0.1	2.46	Ion exchange column treatment of effluent of aerated lagoon	50	
		932	-	2.9	Activated carbon column treatment of effluent of anaerobic filter	50	
		522	<0.1	2.7	Activated carbon column treatment of effluent of aerated effluent of anaerobic filter	70	
Chemical Oxidation	Cook and Foree (15)	330	0.07	2.57	Chlorination	33	65 ml bleach / 1 sample
	Ho, et al. (24)	1,500	0.75	-	Chlorination with calcium hypochlorite	8	8,000 mg/l $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ after 2 hr
		7,162	0.75	-	Ozonation	37	4 hr 7,700 mg O_3 /l. hr
	Karr (28)	4,800	0.66	2.73	Chlorination	22	2,000 mg/l Cl_2
	Roy Weston Inc.	139	0.04	2.1	Chlorination with calcium hypochlorite	0	1,000 mg/l $\text{Ca}(\text{ClO})_2$
		139	0.01	2.1	Ozonation	22	4 hr 34 mg O_3 /l. hr
	This study	1,250	-	2.9	Ozonation of anaerobic filter effluent	37	3 hr 600 mg O_3 /l. hr
		627	-	2.5	Ozonation of aerated lagoon effluent	48	3 hr 400 mg O_3 /l. hr
Reverse Osmosis	Roy Weston Inc.	265	-	2.1	Reverse osmosis	80	80% permeate yield
	This study	53,330	0.65	2.89	Reverse osmosis of leachate at pH 5.5 cellulose acetate membrane	56	50% permeate yield
		53,330	0.65	2.89	Reverse osmosis of leachate at pH 8.0 cellulose acetate membrane	89	50% permeate yield
		900	-	2.9	Reverse osmosis of anaerobic filter effluent DuPont B-9	98	77% permeate yield
	536	-	2.5	Reverse osmosis of aerated lagoon effluent, cellulose acetate membrane	95	50% permeate yield	

ตารางที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วน COD/TOC, BOD/COD, COD และอายุของหลุมฝังกลบ
กับความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอย (Chain and DeWalle, 1976)

Character of Leachate				Effectiveness of Treatment Processes						
COD /TOC	BOD /COD	Age of fill	COD, in milligram per liter	Biological treatment	Chemical precipitation (mass lime dose)	Chemical Oxidation Ca(ClO) ₂	O ₃	Reverse osmosis	Activated carbon	Ion exchange resin
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
>2.8	>0.5	Young (<5 yr)	>10,000	Good	Poor	Poor	Poor	Fair	Poor	Poor
2.0-2.8	0.1-0.5	Medium (5 yr-10 yr)	500-10,000	Fair	Fair	Fair	Fair	Good	Fair	Fair
<2.0	<0.1	Old (>10 yr)	<500	Poor	Poor	Fair	Fair	Good	Good	Fair

2.7.4 โรงงานบำบัดน้ำเสียอ่อนนุช

โรงงานกำจัดขยะมูลฝอยที่อ่อนนุช ตั้งอยู่ที่สุขุมวิท ซอย 77 วัตถุประสงค์เพื่อเปิดเขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร มีพื้นที่ประมาณ 360 ไร่ เริ่มเปิดให้บริการ ปี พ.ศ.2517 ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้ทำการปิดรับมูลฝอยที่จะทำการฝังกลบแล้ว น้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจะทำการบำบัดโดยโรงบำบัดน้ำเสียซึ่งตั้งอยู่ภายใน ก่อสร้างปี พ.ศ. 2520 เป็นระบบบำบัดทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีความสามารถบำบัดน้ำชะมูลฝอยได้ 1,600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ค่อยดีนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2526 จึงมีการปรับปรุงเพิ่มระบบบำบัดทางเคมี ซึ่งมีความสามารถในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยได้ 1,400 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน แล้วจึงปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดลงสู่คลองสองห้อง กระบวนการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่อ่อนนุชแสดงดังรูปที่ 2.24 ส่วนลักษณะของน้ำชะมูลฝอยที่อ่อนนุชจากการศึกษาของผู้วิจัยต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.17 ถึง 2.20



รูปที่ 2.24 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช (สำนักบริหารความสะอาด กรุงเทพมหานคร, 2535)

ตารางที่ 2.17 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบอ่อนนุช หลังผ่านบ่อหมักไร้อากาศ (Wen, 1989)

Components	Sampling Number	Mean Value (mg/l)	Standard Deviation (%)	Coeff. of Variation (%)	Range Value (mg/l)
TOC	13	1618	208.2	12.9	1310-1950
COD	13	3086	449	14.5	2382-4109
BOD5	5	401	55.3	13.8	286-555
NH ₃	13	987	205.9	20.9	608-1509
Total - N	5	1178	244.3	20.7	840-1962
Nitrate	5	0	-	-	-
Nitrite-N	-	-	-	-	-
T - P	13	8.63	2.3	26.7	6.39-15.23
Color	13	9750	3975	40.8	3250-15000
Alkalinity as CaCO ₃	13	4105	679.6	16.6	3050-5800
pH	13	8.5	0.41	4.8	7.6-9.0
SS	13	3.03	0.84	27.7	1.64-4.22
TVS	8	2.18	0.37	17	1.57-2.68
SO ₄	1	11.23	-	-	-
Cl	1	2199	-	-	-
Phenol	5	<1	-	-	BDL
Ca	13	92.5	21	22.7	64-130
Mg	13	71.3	16.3	23.6	20-96
Na	13	1727	464.6	26.9	1114-2586
K	13	1593	491.2	30.8	737-2582
Fe	13	16.3	6.03	37.8	8.21-26.9
Mn	13	2.97	2.82	94.9	0.53-10.5
Cd	13	0.044	0.023	52.3	0.021-0.085
Cu	13	0.423	0.147	34.8	0.298-0.816
Ni	13	2.059	2.736	133	0.627-8.440
Pb	13	0.285	0.072	25.3	0.161-0.414
Zn	13	1.425	1.163	81.6	0.486-3.620
Cr	13	2.439*	1.087	44.6	1.061-4.255
Hg	1	0.001	-	-	-

หมายเหตุ * = เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.18 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบอ่อนนุช เก็บจากบ่อบำบัดที่จุดเทกอง หน่วย
ม.ก./ล ยกเว้น สี และ ฟิเอร์ (วีรวรรณ ปัทมาภีรัต, 2530)

Characteristics	Unit	Range
pH	-	7.0 - 8.6
TS	mg/l	3,275 - 21,541.6
TVS	mg/l	958 - 8,176
TSS	mg/l	81.9 - 2,732
TVSS	mg/l	51.7 - 1,015.4
TOC	mg/l	750 - 2,875
COD	mg/l	986.7 - 9,214.6
BOD ₅	mg/l	178.2 - 1,881.1
TKN	mg/l as NH ₃ -N	298.7 - 2,198.6
Organic - N	mg/l as NH ₃ -N	101.2 - 440.3
NH ₃ -N	mg/l	197.5 - 1,758.3
Total - P	mg/l as P	18.4 - 69.5
Total - Alkalinity	mg/l as CaCO ₃	850 - 9,150
VFA.	Mg/l as CH ₃ COOH	110 - 912.7
Chloride	mg/l	97.6 - 2,355.4
Sulphate	mg/l	42.7 - 340.2
Fat Oil and Grease	mg/l	575 - 2,176.4
PCB	ppb.	<0.7
Chromium	mg/l	<1.0
Mercury	mg/l	3.8 - 4.7 *
Color	Pt. - Co Scale	2,550 - 45,450
Conductivity	µmhos/cm	0.575x10 ⁴ - 4.2x10 ⁴
Odor	-	Earthy Smell ammoniacal

หมายเหตุ * = เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.19 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบอ่อนนุช (Chang, 1988)

Parameters	Date			
	19 Oct.,1987	4 Nov.,1987	23 Nov.,1987	15 Jan.,1988
Weather	Clear	Cloudy	Clear	Clear
Temp (°C)	35	26	32	37
Temp of Leachate (°C)	30	28	27	27
pH	8.02	7.6	7.9	8
Color (Hazen)	6000	5500	5500	4500
Turbidity	180	160	170	900
Alkalinity (as CaCO ₃)	2100	2650	220	3250
S.S.	220	166	250	79
T.S.	6500	6324	6600	5156
D.O.	0.8	0.5	0.6	0.3
BOD ₅	210	190	180	150
COD	1825	2075	1658	1560
NH ₃ -N	252	415	482	546
Org -N	44	45	73	81
TKN	296	460	555	627
T.P.	10.2	7.1	5.2	16.9
Pb	0.089	0.1	0.07	0.03
Cd	0.009	0.007	0.01	0.07
Cr	1.114*	1.04*	0.66*	1.32*
Hg	0.007*	0.012*	0.006*	0.025*

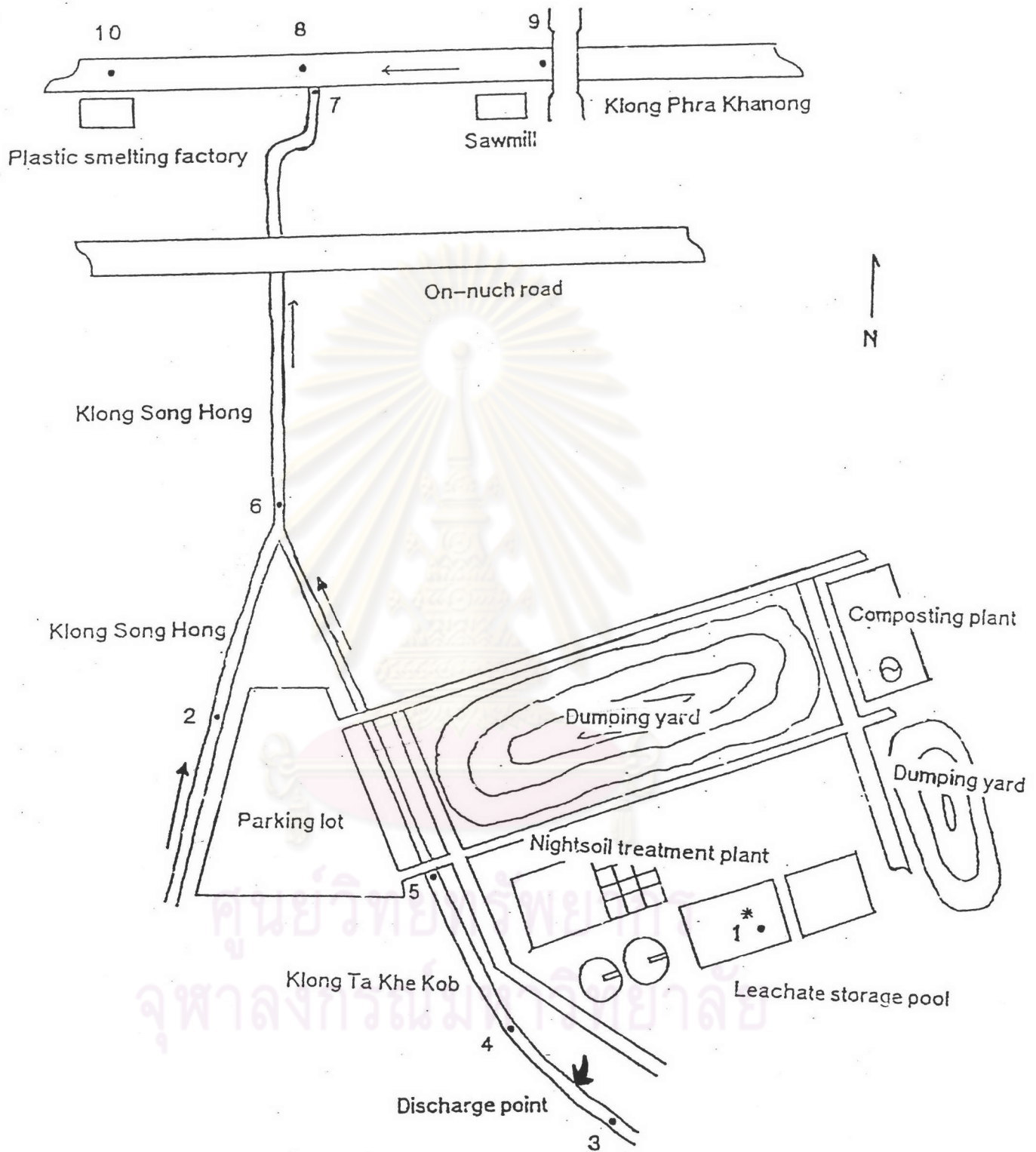
Remark : All units express as mg/l except pH and color

* Exceed standard

ตารางที่ 2.20 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำทะเลผิวย่อยอ่อนนุช (Tharanit Thapanandana, 1993)

Parameter		Station									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temp. (Celcius)	May	29.7	30.9	31.2	31.1	31.2	31	31.4	31.6	31.8	31.7
	July	30.7	30	29.6	29.6	29.4	29.8	30.4	30.8	30.7	30.8
pH (pH unit)	May	8	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	July	8.1	7.4	7.3	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2
DO. (mg/l)	May	0.27	0.88	1.11	1.63	1.13	1.42	1.13	1.07	1.58	1.26
	July	0.09	1.9	0.91	1.06	1.22	1.75	1.64	2.2	2.19	1.98
Conductivity (µmhos/cm)	May	25509	2844	3067	3024	2976	2821	2711	2745	2755	2721
	July	19086	1735	2979	2652	2242	1677	1507	1480	1536	1607
Salinity (ppt.)	May	13.7	0.8	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7
	July	10	0.7	1	1	0.7	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1
Alkalinity (mg/l)	May	587	19	20	21	19	18	17	17	17	17
	July	523	32	35	38	35	30	24	23	22	25
BOD. (mg/l)	May	268	25	41	33	13	16	29	21	12	28
	July	493	35	22	46	43	34	28	17	18	21
COD. (mg/l)	May	6380	142	183	173	157	112	107	138	121	123
	July	4147	178	311	419	283	235	119	77	72	99
SS. (mg/l)	May	174	63	40	63	52	72	48	27	22	22
	July	187	50	82	55	62	39	26	31	27	21
DS. (mg/l)	May	12425	1113	1728	1508	1342	1473	1551	1525	1505	1594
	July	12110	1010	1720	1550	1388	760	860	830	780	880
TS. (mg/l)	May	12583	1252	1769	1571	1394	1544	1655	1552	1527	1616
	July	12297	1060	1812	1635	1245	779	886	861	807	901
Mercury (ppb.)	May	20.71*	1.28	1.16	1.47	1.48	1.34	1.09	1.63	1.34	1.37
	July	3.73	1.31	0.9	1.21	1.48	0.97	0.81	0.82	0.89	1.12
Cadmium (ppm.)	May	Non Detectable									
	July	Non Detectable									
Manganese (ppm.)	May	0.68	0.73	0.54	0.56	0.68	0.62	0.57	0.48	0.53	0.55
	July	0.83	0.81	0.71	0.66	0.64	0.68	0.59	0.58	0.62	0.62

* เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.25 สถานที่ตั้งของโรงงานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช และจุดเก็บตัวอย่าง
 (Tharanit Thapanandana, 1993)

มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดปริมาณโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในน้ำทิ้งไว้ดังตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.21 มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2525)

Characteristics	Unit	Standard
pH	-	5.0 - 9.0
Temperature	°C	< 40 °C
Fat Oil and Grease	mg/l	5
BOD ₅	mg/l	20 - 60
Pesticide	-	None
Sulfide	mg/l as H ₂ S	1.0
Permanganate	mg/l	60
Total Chromium	mg/l	0.5
Copper	mg/l	1.0
Cyanide	mg/l	0.2
Formaldehyde	mg/l	1.0
Lead	mg/l	0.2
Total Manganese	mg/l	5.0
Mercury	mg/l	0.005
Nickle	mg/l	0.2
Phenols and Cresols	mg/l	1.0
Selenium	mg/l	0.02
Zinc	mg/l	5.0
Chromium	mg/l	<1.0
Arsenic	mg/l	0.25
Barium	mg/l	1.0
Cadmium	mg/l	0.03
Free Chlorine	mg/l	1.0

จากตารางแสดงลักษณะของน้ำชะมูลฝอยที่อ่อนนุชของผู้วิจัยต่าง ๆ พบว่า ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยมีปริมาณมากกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ ในตารางที่ 2.18 ซึ่งเป็นการศึกษาของ วิวรรธณ ปัทมาภีรัต (2530) พบว่า ปริมาณของปรอทมีค่าอยู่ระหว่าง 3.8-4.7 มก./ล. เช่นเดียวกับการศึกษาของ Chang (1988) ในตารางที่ 2.19 พบว่า ปริมาณของปรอทมีค่าประมาณ 0.006-0.025 มก./ล. ซึ่งค่าของปริมาณปรอทที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Tharanit Thapanandana (1993) ในตารางที่ 2.20 พบว่า ค่าเฉลี่ยของปรอทในน้ำชะมูลฝอยจากอ่อนนุชจากบ่อเก็บกักมีค่าเท่ากับ 0.0207 มก./ล. นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Chang (1988) ยังพบว่าปริมาณของโครเมียมมีค่าสูงเกินมาตรฐาน คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.66-1.32 มก./ล. และจากการศึกษาของ Wen (1989) ในตารางที่ 2.17 พบว่า ปริมาณของโครเมียมในน้ำชะมูลฝอยอ่อนนุชมีค่าอยู่ระหว่าง 1.061-4.255 มก./ล.

จะเห็นได้ว่าน้ำชะมูลฝอยจากกองขยะที่อ่อนนุช มีปริมาณของโครเมียมและปรอทสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดให้อยู่ในเกณฑ์ก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำ จะได้ไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม

2.8 โลหะหนัก (Heavy Metal)

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 เท่าตัวขึ้นไป มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสมและตกค้างอยู่ในธรรมชาติได้นาน และเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ ตัวอย่างของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) สังกะสี (Zn) เป็นต้น โลหะหนักที่พบมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะ คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่น ๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ได้หลายรูปแบบซึ่งมีความเสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดไปสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว เป็นต้น แต่โลหะบางชนิดก็มีประโยชน์และเป็นธาตุที่จำเป็นต่อมนุษย์ เช่น เหล็ก เป็นต้น แหล่งที่มาของโลหะหนักโดยทั่วไปแล้ว แบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ แหล่งตามธรรมชาติ และแหล่งที่มนุษย์เกี่ยวข้อง

อันตรายจากโลหะหนัก โลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดพิษร้ายแรงเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของโลหะนั้น ๆ เช่น ความสามารถในการละลาย และรูปแบบของสารประกอบทางเคมี

- ปริมาณที่ได้รับ

- ระยะเวลาที่ได้รับ

- ความแตกต่างของความต้านทานในแต่ละบุคคล

- อายุ

- มาตรการป้องกันในการใช้สารเคมี

โลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าจะทางหายใจ ทางผิวหนัง หรือทางปากโดยการรับประทานไปกับอาหาร หรือน้ำดื่มก็ตาม จะเข้าสู่กระแสเลือดและไปทำอันตรายอวัยวะส่วนต่าง ๆ จะปรากฏอาการฉับพลัน หรือเรื้อรัง แล้วแต่ปริมาณที่ได้รับเข้าไปและบางส่วนอาจถูกขับถ่ายออกจากร่างกายทางปัสสาวะ อุจจาระ หรือ ทางเหงื่อ นอกจากนี้อาจจะสะสมอยู่ในเส้นผมและเล็บได้ ตารางที่ 2.22 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยอมรับได้ในการใช้ สำหรับการอุปโภคและบริโภคโดย EPA และตารางที่ 2.23 แสดงปริมาณของโลหะหนักบางชนิดที่มีผลต่อคนและสัตว์ในน้ำ

ตารางที่ 2.22 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยอมรับได้ในน้ำดื่มที่ใช้โดย EPA (Laws, 1981)

Metal	Chemical Symbol	Maximum Permissible Concentration	
		µg/l	µmoles/l
Mercury	Hg	2	0.01
Cadmium	Cd	10	0.09
Selenium	Se	10	0.13
Lead	Pb	50	0.24
Arsenic	As	50	0.67
Manganese	Mn	50	0.91
Chromium	Cr	50	0.96
Iron (as Fe ²⁺)	Fe	300	5.37
Barium	Ba	1000	7.28
Copper	Cu	1000	15.74
Zinc	Zn	5000	76.49

ตารางที่ 2.23 แสดงปริมาณของโลหะหนักบางชนิดที่มีผลต่อมนุษย์และสัตว์ (Lesperance, 1971)

TOXIC EFFECT OF METALS ON HUMANS

Element	Approx. dosage to cause death or acute symptoms (mg)	Concentration in water (ppm.)*
Antimony	50	25
Arsenic	20	10
Cadmium	300**	150
Lead	-	(8)t
Mercury	100**	50
Selenium	20	10
Tellurium	120**	60
Thallium	200**	100

* Based on daily consumption of 2 liters.

** Comparatively large doses of cadmium, mercury, tellurium and thallium are required to caused acute symptoms; however as cumulative poisons, the toxic levels would be much lower.

t Would cause severe chronic poisoning over a short period.

TOXIC EFFECT OF METALS ON AQUATIC INSECTS

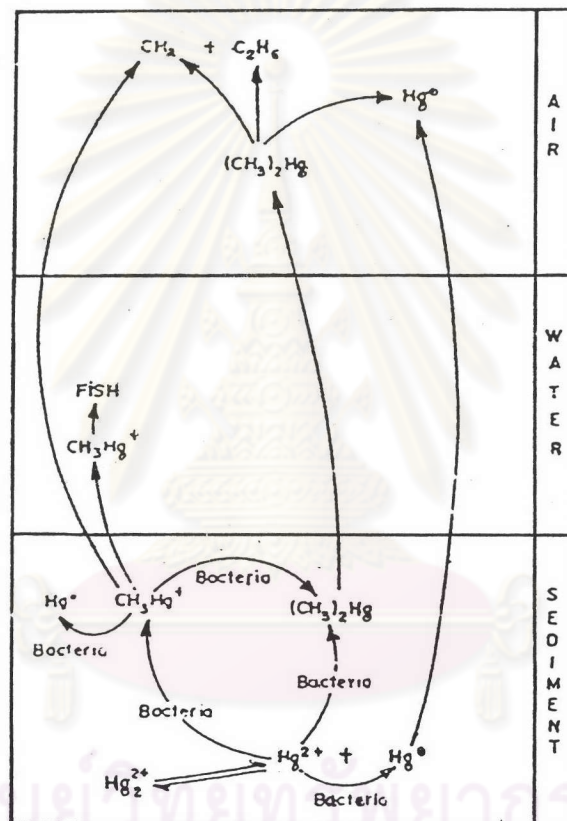
(threshold toxicity)

Element	Concentration (mg/l)	Organism
Barium	29	Daphnia Magna
Cadmium	0.1	Daphnia Magna
Chromium	0.7	Daphnia Magna
Cobalt	5.0	Daphnia Magna
Copper	0.027	Daphnia Magna
Lead	5	Daphnia Magna
Mercury	0.03	Daphnia Magna
Nickel	6	Daphnia Magna
Silver	0.03	Daphnia Magna
Zinc	1.8	Daphnia Magna

2.8.1 ปรอท (Mercury)

ปรอทเป็นโลหะชนิดเดียวที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Hg มีเลขอะตอมเท่ากับ 80 มวลอะตอมเท่ากับ 200.59 อุณหภูมิหลอมเหลวและจุดเดือด คือ -38.9 องศาเซลเซียส และ 356.58 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของปรอทในสถานะของเหลวเท่ากับ 13.46 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และในสถานะของแข็งเท่ากับ 14.193 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สารปรอท

ในธรรมชาติพบอยู่ใน หิน ดิน แร่ น้ำ ตลอดจนพบในสิ่งมีชีวิต สารประกอบของปรอทแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์ ความสัมพันธ์ของสารประกอบทั้ง 2 ชนิดนี้ แสดงดังรูปที่ 2.26 สารประกอบอนินทรีย์ของปรอทมักอยู่ในรูปของธาตุปรอท (Elemental Mercury) สารประกอบเมอคิวรัสไอออน (Mercurous Ion) หรือ สารประกอบเมอคิวริกไอออน (Mercuric Ion) ส่วนสารประกอบอินทรีย์ของปรอทแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของเอริล (Aryl) และ กลุ่มของอัลคิล (Alkyl)



รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ของสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ของปรอท (Wood, 1975)

ปรอทถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ มากมาย ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ปรอทกระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น

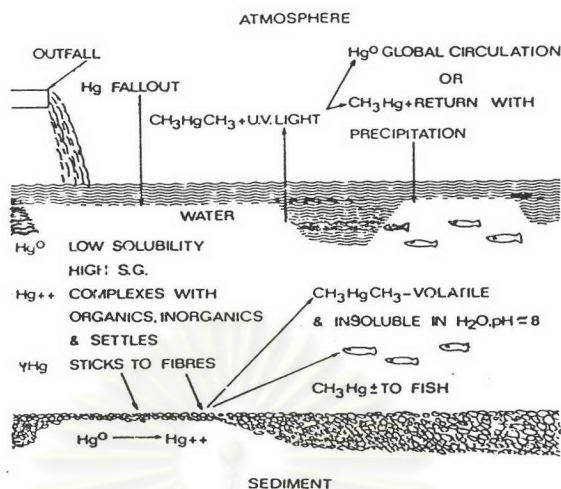
- ใช้ทำมาโนมิเตอร์ และเทอร์โมมิเตอร์
- ใช้ทำตัววัดอุณหภูมิในปฏิกิริยารีดักชัน

- ใช้เป็นตัวกระตุ้น (Catalyst) ในกระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกพีวีซี

- ใช้ทำยาปราบศัตรูพืช และยามาเชื้อรา
- ใช้ทำถ่านไฟฉาย
- ออกไซด์ของปรอท ใช้ทำสีเพื่อป้องกันไม่ให้สีแตกลอกง่าย
- ใช้สกัดทองคำจากแร่ทองคำ
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ เพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษยุ่ยง่าย
- ใช้ในกระบวนการเตรียมโซดาไฟ (NaOH)
- ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า เช่น ทำหลอดไฟ, สวิตช์, แบตเตอรี่

สารปรอทเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมเข้าไปอยู่ในอนุภาคของตะกอนที่แขวนลอย ทั้งที่เป็นพวกสารอินทรีย์และอนินทรีย์ Kurland (1960, Langley, 1973) กล่าวว่า ปรอทสามารถถูกแบคทีเรียเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารปรอทอินทรีย์เมธิล (Methylmercury) ได้ ซึ่งเรียกกระบวนการที่เปลี่ยนปรอทในรูปอนินทรีย์ไปเป็นปรอทอินทรีย์ในรูปของเมธิลว่า กระบวนการเมธิลเลชัน (Methylation) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นโดยที่ปรอทในรูปโลหะ (Metallic Mercury) ถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) ส่วนปรอทฟีนิล (Phenylmercury) และปรอทอัลคิล (Alkylmercury) จะถูกสลายพันธะ จากนั้นแบคทีเรียจะอาศัยกระบวนการทางชีววิทยา ทำให้ไอออนปรอท (Mercuric Ion) ถูกเมธิลเลต (Methylate) เป็นปรอทโมโนเมธิล (Monomethylmercury) หรือปรอทไดเมธิล (Dimethylmercury) แบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนรูปของปรอท คือ Methanogenic Bacteria ปรอทในรูปโมโนเมธิลจะถูกสะสมในสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ส่วนปรอทไดเมธิลมีความสามารถในการระเหยสูง ส่วนใหญ่จึงระเหยออกสู่บรรยากาศ แต่ถ้าในบรรยากาศมีสภาพเป็นกรดหรือได้รับแสงอุลตราไวโอเล็ตก็จะเปลี่ยนรูปเป็นปรอทโมโนเมธิลตกลงมาพร้อมกับฝนอีก ดังแสดงในรูปที่ 2.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปรอท (Langley, 1973)

เมื่อสารปรอทถูกนำพาลงสู่แหล่งน้ำแล้วจะมีโอกาสสะสมไปตามห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของปรอทจะไม่เท่ากันในแต่ละรูปแบบ ปรอทในรูปเมทิล และเอทิล (Methyl and Ethyl) มีความเป็นพิษมากที่สุดรองลงมาได้แก่ ปรอทในรูปโลหะ และปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์จะมีความเป็นพิษน้อยที่สุด Lesperance (1971) กล่าวว่า เมอคิวริกคลอไรด์ (Mercuric Chloride) ความเข้มข้น 10^{-4} โมลต่อลิตร สามารถยับยั้งกระบวนการทางชีววิทยาได้ ดังนั้น การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน 99 เปอร์เซ็นต์ การหายใจของพืช 96 เปอร์เซ็นต์ สารปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายของคนได้ 3 ทาง คือ จมูก ปาก และผิวหนัง ซึ่งพิษของปรอทจะทำอันตรายต่อร่างกายมากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับ

- ทางที่ปรอทเข้าสู่ร่างกาย เช่น ทางผิวหนัง ระบบหายใจ หรือทางเดินอาหาร
- ปริมาณที่ได้รับ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาและความเข้มข้น
- ส่วนใดของร่างกายที่ไปทำปฏิกิริยากับปรอท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภท หรือ ชนิดของสารปรอทว่าอยู่ในรูปแบบใด และอวัยวะที่ทำปฏิกิริยากับสารปรอทคืออวัยวะใด

พิษของปรอทมีทั้งแบบเฉียบพลัน และเรื้อรัง แบบเฉียบพลันจะมีอาการ อาเจียน เลือดออก ปวดท้องอย่างรุนแรง ท้องร่วง ไตอักเสบ จนจึงตายในที่สุด สำหรับการหายใจเอาสารปรอทเข้าไปจะทำให้เกิดการอักเสบของระบบทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ แน่นหน้าอก หายใจไม่ออกจนถึงตายในที่สุด สำหรับอาการแบบเรื้อรังจะคล้ายแบบเฉียบพลัน แต่ไม่รุนแรงนัก

2.8.2 โครเมียม (Chromium)

โครเมียมเป็นธาตุที่ 24 บนตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 31.996 โครเมียมมีค่าออกซิเดชันหลายค่า ตั้งแต่ -1 ถึง +6 โครเมียมที่พบจากในธรรมชาติมักจะอยู่ในรูปของไตรวาเลนซ์ (Trivalent, Cr^{+3}) และเฮกซะวาเลนซ์ (Hexavalent, Cr^{+6}) เนื่องจากเป็นรูปที่ค่อนข้างคงตัว ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{+6}) จะเป็นรูปที่คงตัวและอยู่ได้นาน ส่วนในสภาวะที่ขาดออกซิเจน เฮกซะวาเลนซ์โครเมียมจะถูกลดรูปมาเป็นไตรวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{+3}) ออกไซด์ของไตรวาเลนซ์โครเมียมจะไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนที่ท้องน้ำ โครเมียมทั้งสองรูปมีการนำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ดังแสดงในตารางที่ 2.24

ตารางที่ 2.24 การใช้โลหะหนักบางชนิดในกิจกรรมต่าง ๆ (Cheremisinoff and Habib, 1972a)

HEAVY METAL-major uses

Heavy Metal	Major Uses
Cadmium and compounds	Production of Cu, Ag, Pb, Al alloys, photography, pigmentation, metal finishing, ceramics.
Chromium as Chromates	Inorganic corrosion inhibitors
Hexa Chromium	Explosives, paper, dyes, paints, plating, metal pickling, tanning.
Tri Chromium	Glass, ceramics, photography, textile dyeing mordants.
Leads and compounds	Ammunition, Tetraethyl lead, sheet lead, batteries, pigments, annealing, galvanizing, solder, dyeing, printing, lead salt mfr.
Mercury and compounds	Chlor-alkali plants, explosives, hydrogenation, dehydrogenation reactions, fur mfr., electric equipment, plastics, urethane, dentistry, cosmetics and pharmaceuticals, power generation.

โครเมียมในรูปเฮกซะวาเลนซ์จะถูกนำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ มากกว่าโครเมียมในรูปของไตรวาเลนซ์ โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์จะมีความเป็นพิษมากกว่าโครเมียมไตรวาเลนซ์ ส่วนโครเมียมในรูปของโลหะ (Metallic Chromium) จัดเป็นรูปแบบที่ไม่อันตรายเช่นเดียวกับ ออกไซด์และฟอสเฟตของโครเมียม พิษของโครเมียมขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ พีเอช ภาวะที่ได้รับ และรูปแบบของโครเมียม ปริมาณของโครเมียมที่มีผลทำให้ปลาตายได้อยู่ในช่วง 17-18 มก./ล. และระดับที่นับว่าปลอดภัยอยู่ระหว่าง 0.3-1.0 มก./ล. สำหรับสาหร่ายปริมาณของโครเมียมเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดการตายได้ ค่าของปริมาณโครเมียมอยู่ระหว่าง 0.032-6.4 มก./ล. (Mearns, Oshida, Sherwood, Young and Reish, 1996) โครเมียมเป็นตัวการทำให้เกิดโรคมะเร็งในปอด การหายใจเอาโครเมียม

เข้าสู่ร่างกายจะทำให้โครเมียมเข้าไปสะสมอยู่ในถุงลมปอด และหลอดเลือด นอกจากนี้โครเมียมยังทำอันตรายต่อผิวหนังได้อีกด้วย

2.9 การศึกษาที่ผ่านมา

Argo และ Culp (1972, Lindstedt, Houck and O'Connor, 1971) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มีผลในการลดปริมาณโลหะหนักบางชนิด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.25 ส่วนสาเหตุของการลดลงของปริมาณโลหะหนักยังไม่เป็นที่รู้แน่ชัด แต่มีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดมาจากสารอินทรีย์บางชนิดในน้ำเสียทำหน้าที่เป็นสารถูกดูดซับร่วม (Coadsorbate) ซึ่งจะเชื่อมไอออนของโลหะหนักและถ่านกัมมันต์เข้าด้วยกัน

ตารางที่ 2.25 การดูดซับของโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ (Lindstedt et al., 1971, quoted in Argo and Culp, 1972)

Metal	pH before Carbon	Concentration before Carbon	Concentration after Carbon	Percent Removal
Cd	7.6	0.0007	9×10^{-6}	98.7
Cr ⁺⁶	7.6	0.049	0.00171	96.5
Se	7.6	0.00932	0.00585	37.2
Ag	7.6	0.00145	0.000048	96.7

Concentration units as mg/l

Chain (1977) กล่าวว่า สารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยประกอบด้วยกรดไขมันระเหยได้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีปริมาณลดน้อยลงเมื่ออายุของหลุมฝังกลบเพิ่มมากขึ้น กลุ่มของสารอินทรีย์ที่คงตัวเมื่ออายุของหลุมฝังกลบมากขึ้น คือ สารที่เหมือนฟัลวิก (Fulvic-like Material) ซึ่งเป็นกลุ่มของ Carboxyl และ Aromatic Hydroxyl การเพิ่มขึ้นของความคงตัวของน้ำชะมูลฝอยจะมี Carbohydrates, Hydrolyzable Amino Acids และสารประกอบ Aromatic Hydroxyl เพิ่มขึ้นตามลำดับ น้ำชะมูลฝอยที่มาจากหลุมฝังกลบใหม่เหมาะที่จะบำบัดโดยกระบวนการทางชีววิทยา ส่วนน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่าเหมาะที่จะบำบัดโดยวิธีทางกายภาพเคมี

Chain และ DeWalle (1976) กล่าวว่าในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ ถ่านกัมมันต์สูง การกำจัดซีโอดีของระบบแบบแบตช์ (Batch System) มีค่าอยู่ระหว่าง 34-85% และสำหรับการใช้ถังดูดคืดผิวแบบแท่งมีค่าอยู่ระหว่าง 59-74% ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุม ฝังกลบใหม่พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากในน้ำชะมูลฝอยนี้มีปริมาณ ของกรดไขมันระเหยได้อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเหมาะที่จะบำบัดด้วยวิธีทางชีววิทยา สำหรับสาร อินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ จะเป็นสารที่คล้ายกรดฟัลวิค (Fulvic-like Material) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-10,000 ค่าของน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของหลุมฝังกลบ เพิ่มขึ้น การใช้ถ่านกัมมันต์บำบัดน้ำชะมูลฝอย เหมาะที่จะใช้บำบัดน้ำชะมูลฝอยที่มีความคงตัวทาง ชีวภาพ ในการทดลองบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่า ที่มีอัตราส่วน BOD/COD เท่ากับ 0.04 พบว่า ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงถึง 85% ความเข้มข้นของซีโอดีที่ผิว หน้าสูงถึง 0.17 มก.COD/มก. ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่มีกรดไขมัน ระเหยได้เป็นปริมาณมาก

Chang (1988) ได้ทำการศึกษาวิธีบำบัดซีโอดีของน้ำชะมูลฝอยที่หลุมฝังกลบมูลฝอยอ่อนนุช พบว่าปริมาณของถ่านกัมมันต์ 20 ก./ล. ที่พีเอชของน้ำชะมูลฝอย 8 สามารถกำจัดซีโอดีได้ 94% ซีโอดี 75% TKN 25% TP 77% แคลเมียม 80% โครเมียม 90% และปรอท 70% โดยใช้เวลาดำเนินการ 30 นาที

Chang (1991) ได้ทำการศึกษาการดูดคืดผิวของแคลเมียมและตะกั่วจากน้ำชะถ่านหิน โดยใช้อ่านกัมมันต์แบบผงชนิด Darco HDB พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดคืดผิวของแคลเมียม และตะกั่ว คือ อัตราเร็วของการผสมเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เวลาดำเนินการ 15 นาที และปริมาณถ่าน กัมมันต์ที่ใช้เท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร จึงจะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเมียม 96.5% และตะกั่ว 95%

Cheremisnoff และ Habibb (1972b) ได้ศึกษาการดูดคืดผิวของโครเมียมด้วยถ่าน กัมมันต์จากน้ำเสีย พบว่าเวลาดำเนินการ พีเอช ความเข้มข้นของโครเมียม และชนิดของถ่านกัมมันต์มี ผลต่อการดูดคืดผิวของโครเมียม การดูดคืดผิวที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นภายใน 10 นาที สำหรับการ ศึกษาด้วยวิธีแบบแบตช์ ส่วนการดูดคืดผิวของโครเมียมด้วยถังดูดคืดผิวแบบแท่ง มีประสิทธิภาพ ที่ดีเช่นเดียวกันที่พีเอชต่ำ ในการประเมินค่าใช้จ่ายอย่างคร่าวๆ เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.26 พบว่า ที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล. อัตราการไหล 15 แกลลอนต่อนาที และ

เวลาทำงาน 8 ชั่วโมง กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เสียค่าใช้จ่าย 5.37 เหรียญสหรัฐ ต่อวัน คิดเป็น 70% ของกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการรีดักชัน

ตารางที่ 2.26 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของวิธีต่างๆ ในการกำจัดโครเมียม (Cheremisinoff and Habibb, 1972 b)

System	Operation cost \$ per day	Capital cost (\$, Dollars)
Carbon adsorption	8.00	5,500
Conventional-reducing Agent: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	10.00	8,00
Ion flotation	10.50	4,500
Liquid-liquid extraction	11.00	8,500
Ion exchange	12.50	8,500

Notes:

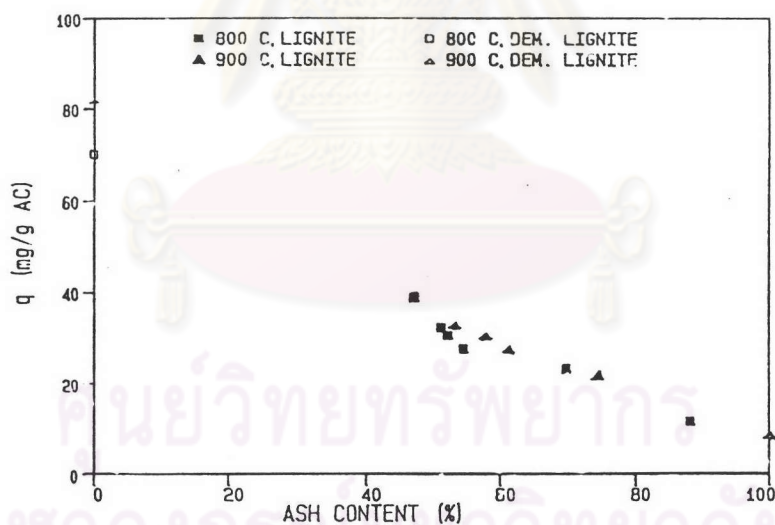
1. 15 gpm flow rate, 100 ppm max. Cr content, 8 hr/day, 250 days/year Operating cost, includes 13% yearly depreciation, 5% yearly maintenance and fuel, power, labor, reagent costs.
2. Inclusion of recovery system for chromium would entail additional \$1500.00 for carbon adsorption or ion exchange system. Credit for recovery would pay off in terms of operating cost savings, the increased plant costs within 1.1 years for ion exchange system and within 2.2 years for carbon adsorption system.

Clark และ Piskin (1977) ได้ศึกษาปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบมูลฝอย พบว่าปริมาณโลหะหนักที่พบมากที่สุดคือ เหล็ก ที่พบรองลงมาคือ ทองแดง สังกะสี และโบรอน ตามลำดับ ซึ่งรวมกันแล้วมีปริมาณน้อยกว่า 1% ขององค์ประกอบในน้ำชะมูลฝอยทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเหล็กที่พบในน้ำชะมูลฝอยตัวอย่างเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ทั้งหมด ส่วนแมงกานีส ตะกั่ว แบเรียม แคลเซียม และปรอท มากกว่า 50% ของตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่เก็บมา มีค่าเกินความเข้มข้นที่มากที่สุดที่ยอมให้มีได้ ส่วนปริมาณของโครเมียม อาร์เซนิกเงิน และทองแดง มีค่าเกินความเข้มข้นที่มากที่สุดที่ยอมให้มีได้เช่นเดียวกัน

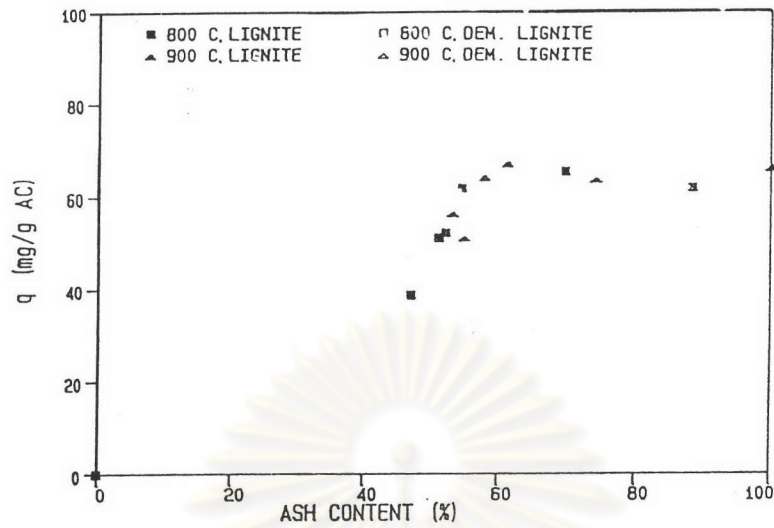
Cook และ Foree (1974) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดี และ การใช้ถ่านกัมมันต์ในการทำความสะอาดน้ำที่ออกจากระบบทางชีวภาพนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี ในการกำจัดซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ นอกจากนี้อินทรีย์คาร์บอนและสีจะถูกกำจัดด้วย ซึ่งพืชของระบบมีผลต่อการทำงานอย่างมาก รายละเอียดของผล

การทดลองมีดังนี้ ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยคิบ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 71% ทีโอซี 79% ของแข็งทั้งหมด 11.4 % สารแขวนลอย 33% และความขุ่น 63% ส่วนน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มมาแล้ว พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถที่จะกำจัดซีโอดีได้ 94% ทีโอซี 87% ของแข็งทั้งหมด 10% สารแขวนลอย 100% และความขุ่น 88%

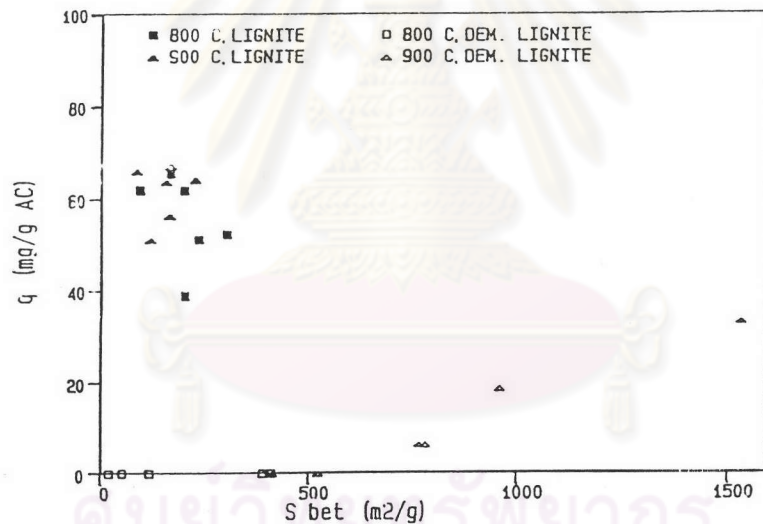
Diamadopoulos, Samaras และ Sakellaropoulos (1992) ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับฟีนอล กรดฟัลลิก และอาร์เซนิก (V) โดยในการทดลองจะใช้ถ่านหินลิกไนต์ที่มีเถ้า (ปริมาณเถ้า ประมาณ 22%) และไม่มีเถ้า (Ash-free, ปริมาณเถ้า ประมาณ 0.15%) เพื่อนำไปทำถ่านกัมมันต์ พบว่า ความจุของการดูดซับฟีนอลขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าที่พบในถ่านกัมมันต์ สำหรับการดูดซับฟีนอลนั้น ความจุของการดูดซับฟีนอลลดลงอย่างคงที่ เมื่อปริมาณของเถ้าในถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.28 ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีเถ้ามีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีเถ้าถึง 4 เท่า ส่วนการดูดซับฟีนอลของกรดฟัลลิก และอาร์เซนิก พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีเถ้าดูดซับฟีนอลได้ไม่ด้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30



รูปที่ 2.28 การดูดซับฟีนอลของฟีนอลกับปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ (Diamadopoulos et al., 1992)



รูปที่ 2.29 การดูดซับของกรดฟอสฟอริกกับปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ (Diamadopoulos et al., 1992)



รูปที่ 2.30 การดูดซับของอาร์เซนิก (V) กับปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ (Diamadopoulos et al., 1992)

Ho, Boyle และ Ham (1974) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 400 ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ผลจากการทดลองแบบแบตช์ ดังแสดงในตารางที่ 2.27 พบว่า ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อย่างน้อยที่สุด เท่ากับ 4,000 มก./ล. จึงจะได้ผลที่ดีในการกำจัดซีโอดี และเวลาสัมผัสของการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของซีโอดีนั้น ใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาที ส่วนในการทดสอบโดยดึงดูดซับแบบแห้ง พบว่า เวลาสัมผัสในการกำจัดซีโอดีและกลืนเท่ากับ 4 นาที และสามารถที่จะกำจัดซี

และกลั่นได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลา 20 นาที และที่เวลาสัมผัสนี้มีประสิทธิภาพในการลดซีโอดีได้ 55% และสามารถกำจัดเหล็กได้มากกว่า 60% ดังแสดงในตารางที่ 2.28

ตารางที่ 2.27 ผลการทดลองแบบเบดซ์ (Ho et al., 1974)

Carbon Dose (mg/l)	Final pH	Visual Color	Odor	COD (mg/l)	Fe (mg/l)	Cl (mg/l)	Hard- ness (mg/l)	TDS (mg/l)
Unfiltered raw leachate ^a	7.4	muddy brown	strong	4,920	66.0	3,630	2,050	10,170
0 (blank)	7.5	muddy yellow brown	strong	5,070	57.0	b	2,050	9,930
2,000	7.55	clear yellow	slight	4,000	18.0	b	2,050	9,520
4,000	7.55	clear yellow	slight	3,670	12.0	b	1,880	9,280
8,000	7.55	very slight yellow	littie	3,370	9.4	b	1,880	9,330
16,000	7.6	almost colorless	none	3,320	1.7	b	1,880	9,060
20,000	7.6	colorless	none	3,500	nil	b	1,880	9,060

All sample filtered with Whatman No.42 filter paper before analysis (including blank) except for raw leachate.

^a Source: United Waste landfill in Monomonee Falls, Wis. (sampled on June 23, 1972) and b: No change observed.

ตารางที่ 2.28 ผลการทดลองโดยถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Ho et al., 1974)

Contact time (min.)	Final pH	Visual Color	Odor	COD		Fe		Total hardness (%Removed)	TDS	
				mg/l	%removed	mg/l	%removed		mg/l	%Removed
Raw leachate ¹	7.6	Muddy Yellow	Strong	7,213		40		(2,440 mg/l)	11,500	-
4.2	7.9	Clear		4,184	42.0	14	65	15.3	9,600	16.3
4.2 ²	7.8	slight	Slight	4,162	42.3	24	40	15.3	9,700	15.7
9.6	7.8	Yellow		4,407	38.9	18	55	23.0	9,800	15.0
21.8	8.3	Clear		3,116	56.8	14	65	43.0	9,300	19.3
26.2	8.3	very		3,174	56.0	12	70	36.0	9,250	19.5
29.2 ³	8.1	Slight	None	3,462	52.1	12	70	30.6	9,500	17.1
45.0	8.2	Yellow	Detectable	2,943	59.2	14	65	36.0	9,400	18.2
45.7 ⁴	8.1	Tinge		3,390	53.0	10	75	29.0	8,800	23.5
6.8	8.1			3,462	52.0	9.2	77	37.6	8,800	23.4

* Chloride concentration remained unchanged

¹Source: united Waste landfill located in Monomonee Falls, Wis., sampled on May 12, 1972. Analysis are an average of four filtered blanks.

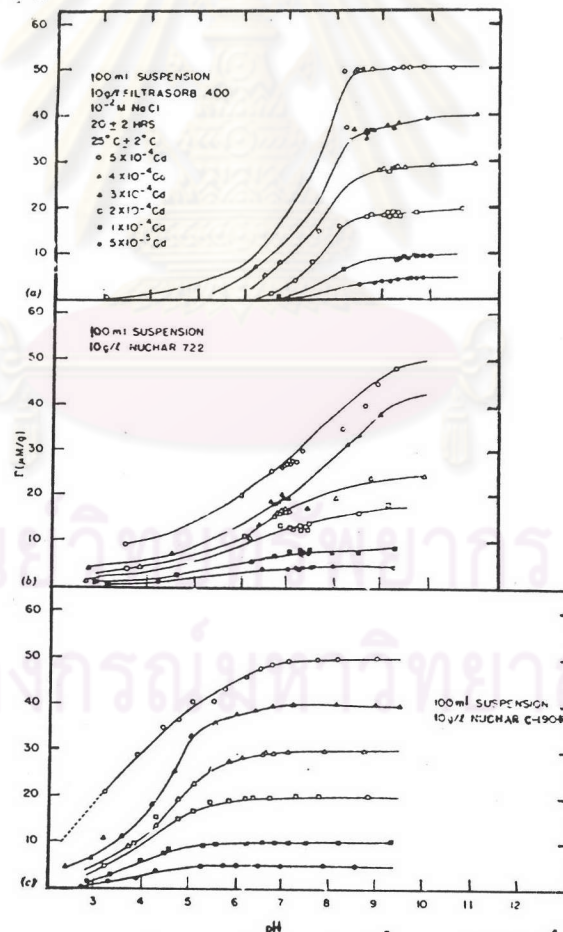
²Not filtered before analysis

³Leachate pH adjusted to 6.5 before adsorption

⁴Test using large column.

Huang และ Garrett (1977) ศึกษาผลกระทบของสารโพสทีอิลคโตรไลต์และผงดิน ซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว จากการทดลองพบว่า สารทั้งสองนี้ไม่สามารถเข้าไปขวางบริเวณรูพรุนของสารดูดซับตะกั่วได้ แต่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบถ่วงตะกั่วแบบแห้งที่มีการป้อนน้ำเสียแบบไหลลง (Down Flow) อนุภาคของดินสามารถทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากแรงดันที่ผ่านชั้นถ่าน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับตะกั่วของถ่านกัมมันต์จะลดลงที่ละน้อย อันเนื่องมาจากการอุดตันทางกายภาพ หรือ การสะสมของอนุภาคดินบนผิวหน้าถ่าน

Huang และ Ostovic (1978) ได้ศึกษาการดูดซับตะกั่วแคดเมียม (II) ด้วยถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด คือ Nuchar 722, Nuchar C-190-N และ Filtrasorb 400 ดังแสดงในรูปที่ 2.31 พบว่าที่พีเอชเป็นกรดถึงพีเอชที่เป็นกลาง ถ่านกัมมันต์ชนิด Nuchar C-190-N มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วของแคดเมียมได้ดีที่สุด ผลการดูดซับตะกั่วของแคดเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การดูดซับตะกั่วของแคดเมียมบนถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ (Huang and Ostovic, 1978)

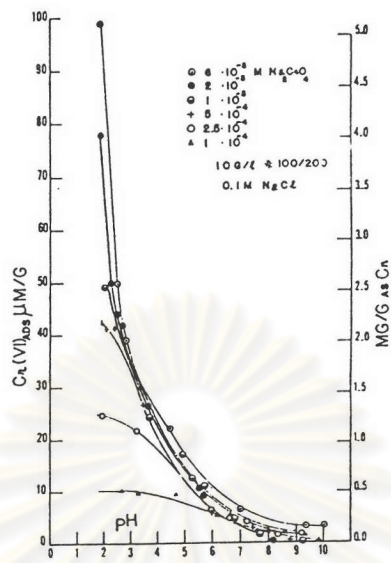
Humenick และ Schnoor (1974) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดปรอท(II) โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ ในการทดลองจะมีการเติมสารคีเลต (Chelate) บางชนิดลงในกระบวนการดูดซับ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.29 จากการทดลอง สารคีเลตที่ละลายน้ำได้ คือ APDC และ Tetramine ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของปรอทมากกว่าสารคีเลตชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 2.29 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับปรอทเมื่อเติมสารคีเลตต่างๆ (Humenick and Schnoor, 1974)

Chelate used	Stoichiometric ratio of chelate to mercury	Chelate dose (mg/l)	Mercury remaining in Solution after adsorption and filtration ($\mu\text{g/l}$)
No chelate	-	-	4,500
Toluene, 3-4 diamine	1.6 : 1	10.0	5,050
CDTA	0.5 : 1	10.0	5,500
Toluene, 3-4 diamine	8 : 1	50.0	4,950
CDTA	2.5 : 1	50.0	4,900
No chelate (CS_2 soaked activated carbon)	-	-	≤ 0.2
Triethylene-tetramine	7 : 1	50.0	2,400
APDC	6 : 1	50.0	14.8

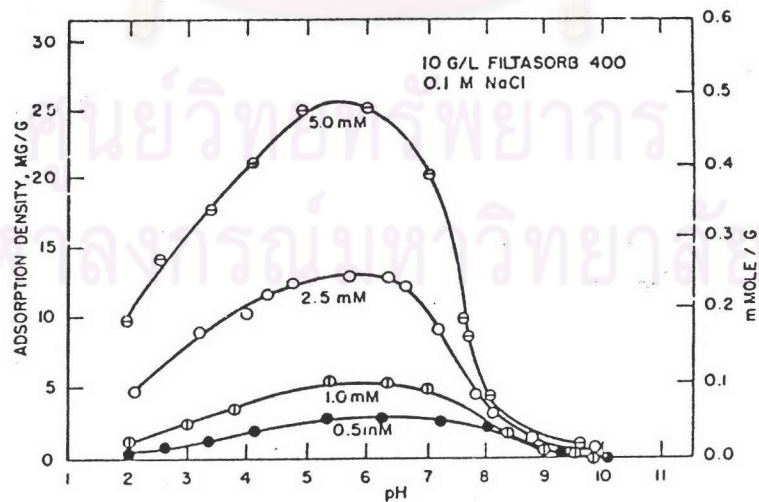
Experimental conditions: 2 g Calgon Filtrasorb 300 Carbon; 200 ml of 16.0 mg/l Hg (II); 6 hr agitation at 20 °C

Huang และ Wu (1975) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ จากการศึกษพบว่า การกำจัดโครเมียมจะได้ผลดีเมื่อระบบมีสภาพเป็นกรด ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ปริมาณของโครเมียมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง



รูปที่ 2.32 ปริมาณการดูดติดของโครเมียมกับพีเอช (Huang and Wu, 1975)

Huang และ Wu (1977) ได้ศึกษาถึงผลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดติดผิวของโครเมียม (VI) และ โครเมียม (III) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 400 ผลของการศึกษา พบว่าโครเมียม (VI) ถูกกำจัดได้เร็วกว่า โครเมียม (III) ถึง 2 เท่า พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดติดผิวของโครเมียม (VI) คือ 5.5-6 และ 5 สำหรับโครเมียม (III) ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของโครเมียมที่มีต่อการดูดติดผิว (Huang and Wu, 1977)

Johansen และ Carlson (1976) ได้ศึกษาถึงลักษณะขององค์ประกอบน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบ และได้สรุปว่า กรดอินทรีย์มีปริมาณมากที่สุดถึง 90% ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำชะมูลฝอยที่เข้มข้น อัตราส่วนของ BOD/COD เพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ส่วนปริมาณของโลหะหนัก พบว่า เหล็กมีปริมาณมากที่สุดคือน้ำชะมูลฝอย และสังกะสีมีปริมาณมากรองลงมาจากเหล็ก ส่วนโครเมียม นิกเกิล ทองแดง และตะกั่ว ที่พบมีปริมาณต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.30

Kawamura (1991) กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์นอกจากจะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ แล้ว ถ่านกัมมันต์ยังสามารถดูดซับไอออนของสารอนินทรีย์บางชนิดได้อีกด้วย ลำดับการดูดซับไอออนของประจุบวก คือ $H^+ > Al^{3+} > Ca^{2+} > Li^+ > Na^+$ และสำหรับประจุลบ คือ $NO^- > Cl^-$

Krishnan และ Simonsen (1972) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันโดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ในการทดลองจะใช้ถังดูดซับแบบแบ่ง 4 ถัง โดยถังแรกมีชั้นถ่านสูง 0.9 เมตร นอกนั้นมีชั้นถ่านสูง 1.5 เมตร รวมแล้วความสูงทั้งหมดของชั้นถ่าน 5.5 เมตร ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.31 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านกัมมันต์บำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันมีประสิทธิภาพที่ดี ค่าเฉลี่ยของการกำจัดของแข็งแขวนลอย บีโอดี FSUOD ทีโอซี น้ำมัน และฟีนอล เท่ากับ 62%, 85%, 83%, 65%, 85% และ 99% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.31 สรุปความสามารถของระบบถังดูดซับแบบแบ่ง (Kirshnan and Simonsen, 1972)

Contaminants	Concentration (mg/l)				Removal (%)	
	Influent to column 1		Effluent from Column 4			
	Range	Average	Range	Average	Range	Average
SS	3-20	8	1-15	3	0-90	62
BOD ₅	20-54	36	3-10	5	77-91	85
FSUOD	42-84	57	5-17	9	81-90	83
TOC	25-61	37	10-17	13	52-80	65
Oil	7.5-17.2	12.3	0.8-2.5	1.8	77-96	85
Phenol	0.35-6.8	2.7	0-0.1	0.02	89-100	99

ตารางที่ 2.30 ลักษณะของน้ำชะมูลฝอยของหลุมฝังกลบ (Johansen and Carison, 1976)

Parameter	Unit	Norway						U.S.A.	
		Gronmo	Branasdalen	Yugeseth	1st I	1st II	Taranrod	Cedar Hills	Kent Highland
COD	mg O/l	470	1080	9425	825	110	3455	38800	3800
BOD Total	.mgO/l	320	870	5250	590	50	2300	24500	2460
TOC	mg C/l	100	250	1700	180	30	800		
Total N	mgN/l	182	254	250	155	16.6	156	630	56
NH ₄ -N	mgN/l	120	225	227	141	10.2	84		
NO ₃ -N	mgN/l	0.04	0.01	0.04	0.02	0.79	0.68		
Organic N	mgN/l	62	29	23	17	6	71		
Total P	mgP/l	0.6	1.7	7.7	3.3	0.1	1.6	11.3	5.9
1 Suspended solids	mg/l	140	397	466	270	68	1079	310	220
Volatile suspended solids	mg/l	85	98	182	229	11	602	170	90
Total solids	mg/l	2960	2730	4160	3880	610	3160		
Total volatile solids	mg/l	760	1005	2180	890	145	1670		
pH		6.8	6.9	5.9	7.0	6.4	6.2	5.4	6.4
Alkalinity	mg/l	30	41	39	31	6.2	21.6	130	26
Spec. conductance	μS/cm	3310	3210	3380	3050	655	2370		
Ca	mg Ca/l	188	198	400	173	99	218		
Mg	mg Mg/l	66	96	54	58	13	40		
Na	mg Na/l	462	229	206	312	34.8	197		
K	mg K/l	200	172	187	219	21.3	214		

ตารางที่ 2.30 (ต่อ)

Parameter	Unit	Norway						U.S.A.	
		Gronmo	Branasdalen	Yngeseth	1st I	1st II	Taranrod	Cedar Hills	Kent Highland
1 Chloride	mg Cl/l	680	280	370	590	68	340		
Sulphate	mg SO ₄ /l	30	10	100	37	41	100		
Fe	mg Fe/l	67.6	78.0	234	37.7	11.5	68.9	810	245
Zn	mg Zn/l	0.055	0.095	0.65	0.085	0.12	2.65	155.0	5.30
Cr	mg Cr/l	0.023	0.035	0.06	0.027	0.002	0.17	1.05	0.05
Ni	mg Ni/l	<0.1	0.02	0.03	0.015	0.005	0.12	1.20	0.10
Cu	mg Cu/l	0.065	0.011	60.322	0.009	0.008	0.021	1.30	0.18
Cd	mg Cd/l	0.0005	0.0001	0.0009	0.002	0.0005	0.0008	0.03	0.01
Pb	mg Pb/l	0.004	0.001	0.01	0.001	0.001	0.015	1.40	<0.1
Co	mg/ Co/l		0.009	0.07	0.018	0.004	0.033	-	-
2 COD	mg O/l	520	825	9730	215	145	245	9100	455
Total N	mg N/l	155	255	305	80	12	24	172	31
Fe	mg Fe/l	84.3	12.7	258	10.2	6.8	10.3	215	38

* Calculation as the difference between total N and NH₄-N.

1 = Dry weather analysis

2 = wet weather analysis

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lema, Mendez และ Blazquez (1988) ได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์สัดส่วนของสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยของผู้วิจัยหลายท่าน ซึ่งผลของการวิจัยสรุปได้ว่า กรดไขมันระเหยได้มีปริมาณมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.32 นอกจากนี้ยังได้สรุปแนวทางในการเลือกวิธีการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ดังแสดงในตารางที่ 2.33 และยังคงกล่าวว่า วิธีการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ทั้งแบบผงและแบบเม็ด มีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดสารอินทรีย์ แต่มีข้อเสียคือ ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดต้องมีการฟื้นคืนสภาพ (Regeneration) บ่อยครั้ง และต้องใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงเป็นปริมาณมาก

Logsdon และ Symons (1973) ได้ศึกษาการกำจัดปรอทด้วยวิธีการต่างๆ ในกระบวนการทำความสะอาดน้ำ พบว่า ในการกำจัดปรอทโดยวิธีโคแอกกูเลชันนั้นเกิดขึ้น เนื่องจากการกำจัดสารที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ ซึ่งปรอทจะดูดติดอยู่บนผิวของสารเหล่านี้ ปรอทในรูปของเมธิลจะถูกกำจัดได้น้อยกว่าปรอทอนินทรีย์ ในกระบวนการแก้เนื้อกระด้าง (Softening) ปรอทอนินทรีย์จะถูกกำจัดได้ดีเมื่อพีเอชอยู่ระหว่าง 10.7-11.4 ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการดูดติดผิวของปรอทบนฟล็อกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนปรอทในรูปของเมธิลจะไม่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการนี้ ส่วนการดูดติดผิวโดยการใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่า ได้ผลดีสำหรับการกำจัดปรอททั้ง 2 รูปแบบ ความสามารถในการกำจัดปรอทของกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้

ตารางที่ 2.32 สัดส่วนของสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอย (Lema et al., 1988)

From	Age ^a	COD	Acetic acid	Propionic acid	Butyric acid	Others	VFA (%)	Reference
The Netherlands	Y	28/37	4.5/6.8	2.2/3.4	3.6/5.1	1.2/1.6	59/71	Bekker and Kaspers, 1981
United Kingdom ^m	Y	23.8	1.16	1.36	2.0	1.1	38	Robinson and Maris, 1985
Canada	Y	13.78	1.42	1.01	1.77	0.38	51	Henry et al., 1987
France	Y	48.0	8.5	5.25	6.13	5.75	84	Millot et al., 1987
Spain	MA	22.3	3.5	0.91	1.81	2.5	61.5	Lema et al., 1987b
Canada	MA	3.75	0.56	0.15	0.19	0.08	37	Robinson and Maris, 1985
United Kingdom	O	5.03	0.34	0.29	0.41	0.08	34	Pohland, 1980
Lysimeter	-	40.2	15.6 (VFA as Acetic)				41	

^a Y : young ; MA : medium age ; O : old

All values are in g/l except for VFA (%)

ตารางที่ 2.33 แนวทางในการเลือกวิธีบำบัดน้ำชะมูลฝอย (Lema et al.,1988)

		With Domestic wastewater	Recycling	Lagooning	Aerobic	Anaerobic	Chem/Phys
Average	H	O	+	+	+	+	O
temperature	M	O	O	+	O	+	O
	L	O	O	-	-	-	O
Rainfall	H	O	-	-	O	O	O
	M	O	-	-	O	O	O
	L	O	+	+	O	O	O
Leachate flow	H	-	O	O	O	-	-
	M	-	O	O	O	O	O
	L	+	+	+	O	O	O
Leachate concentration	H	-	+	O	-	+	-
	M	O	O	+	O	+	-
	L	+	O	+	+	O	+
Landfill age	O	+	O	-	-	-	+
	Y	-	+	+	+	+	O
Space availability	H	O	O	+	+	O	O
	M	O	O	O	O	+	+
	L	+	C	-	-	+	+

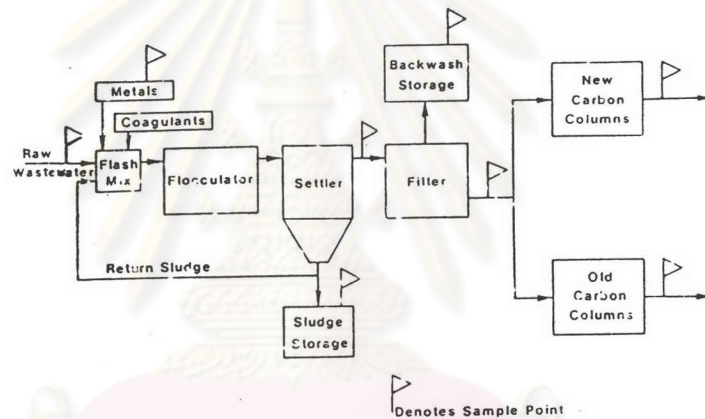
H: high; M: medium; L: low; //O:old; Y: young; /// +: favorable; O: indifferent; -: unfavorable

Martin และ Al-Bahrani (1977) กล่าวว่า ความจุของการดูดซับของตัวถูกละลายแต่ละชนิดที่จุดสมดุลในสารละลายผสม (Multi-solute) บนถ่านกัมมันต์นั้น มีผลกระทบอย่างมากจากตัวถูกละลายอื่นๆ ที่มีอยู่ในสารละลาย ในถึงดูดซับแบบแบ่ง สารประกอบที่มีการดูดซับได้ไม่ดี จะหลุดออก เมื่อสารประกอบที่ดูดซับได้ดีถูกดูดซับมากขึ้น โดยสารประกอบนั้นดูดซับได้น้อยลงเท่าไรก็จะได้รับอิทธิพลจากการดูดซับของตัวถูกละลายอื่นเพิ่มขึ้นเท่านั้น โดยผลกระทบจะมากขึ้นเมื่อมีจำนวนตัวถูกละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งผลกระทบดังกล่าวจะมีผลต่อการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสารอินทรีย์ที่เป็นป็น

Martin และ Iwugo (1982) ได้ศึกษาผลกระทบของพีเอชและสารแขวนลอยในการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำและน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับ ผลจากการศึกษาพบว่า ของแข็ง

แขวนลอยที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 200 มก./ล. ไม่มีผลกระทบมากนักต่อการดูดซับของสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ ส่วนของแข็งอินทรีย์แขวนลอยปริมาณมากกว่า 500 มก./ล. มีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับทั้งในด้านของอัตราเร็วการดูดซับและความจุของการดูดซับ ส่วนผลกระทบจากพีเอช พบว่า การดูดซับของสารอินทรีย์มีผลดีที่พีเอชต่ำประมาณ 3-5 และที่พีเอชสูงประมาณ 10-11 ส่วนค่าของพีเอชในช่วง 7-8 ไม่ได้ผลที่ได้นัก

Maruyama, Hannah และ Cohen (1975) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก 11 ชนิด ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ซึ่งจะใช้สารโคแอกกูแลนซ์ 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.34 ผลของกระบวนการทางกายภาพเคมีที่ประกอบด้วยกระบวนการโคแอกกูแลนซ์ การตะกอน การกรองและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 2.35



รูปที่ 2.34 กระบวนการทางกายภาพเคมี (Maruyama et al.,1975)

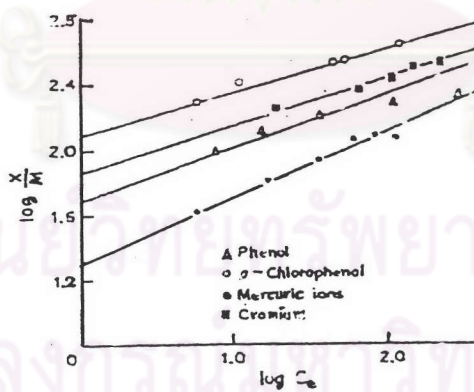
ตารางที่ 2.34 สาร โคแอกกูแลนซ์และสภาวะที่ใช้ในการทดลอง (Maruyama et al.,1975)

Plant	System	Coagulant	pH
1	Iron	Ferric sulfate, 45 mg/l Fe	6.0
2	Low lime	Lime, 260 mg/l Ferric sulfate, 20 mg/l Fe	10.0
3	High lime	Lime, 600 mg/l	11.5

ตารางที่ 2.35 ผลของการกำจัดโลหะหนักจากกระบวนการทางกายภาพเคมี
(Maruyama et al.,1975)

Removal of metals by iron system			Removal of metals by low lime system			Removal of metals by high lime system		
Σ Removal (%)	With New Carbon	With Old Carbon	Σ Removal (%)	With New Carbon	With Old Carbon	Σ Removal (%)	With New Carbon	With Old Carbon
10-20	Mn					75-80		Zn
20-30		Mn	80-85	As	As, Cr ⁶⁺	80-85	Ba	As
30-40	Ni		85-90	Zn	Zn, Cu	85-90	Zn, As	Ba
90-95		Zn	90-95	Mn		90-95	Cu, Hg	Cu, Hg
95-100	Cr ³⁺ , Pb, Zn, Cu Cd, Ba, As, Cr ⁶⁺	Cr ³⁺ , Pb, Ni, Cu, Cd, Ba, As, Cr ⁶⁺	95-100	Cr ³⁺ , Pb, Ni, Cu, Cd, Ba, Cr ⁶⁺	Cr ³⁺ , Pb, Ni, Mn, Cd, Ba	95-100	Cr ³⁺ , Pb, Ni, Mn, Cd, Cr ⁶⁺	Cr ³⁺ , Pb, Ni, Mn, Cd, Cr ⁶⁺

McKay, Bino และ Altameni (1985) ศึกษาการดูดซับของ Phenol, p-chlorophenol, Mercuric ions และ Sodium dodecyl sulphate โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 400 ผลจากการศึกษาไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช พบว่า ความสามารถในการดูดซับของสารเหล่านี้เท่ากับ 213, 434, 35, และ 361 มก/ก ตามลำดับ ขนาดของถ่านที่ใช้คือ 0.5-0.71 มม. และเวลาสัมผัส 2 วัน เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล ดังแสดงในรูป 2.35



รูปที่ 2.35 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของ Phenol, p-chlorophenol, Mercuric ions และ Sodium dodecyl sulphate (Mckay et al., 1985)

McLellan และ Rock (1988) ได้ทำการศึกษาการใช้ถ่านหินแบบร่วน (Peat) ในการกำจัดน้ำชะมูลฝอยที่มีโลหะหนักปนอยู่ พบว่า ในการศึกษาเวลาสัมผัสที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียม

โครเมียม ทองแดง และตะกั่ว เวลาสัมผัสที่มากขึ้นทำให้การดูดติดผิวเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.36 โครเมียมเป็นโลหะหนักที่มีการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ 142% และ 370% สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 500 และ 50 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 1 ชั่วโมงไปเป็น 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.36 เวลาสัมผัสกับการดูดติดผิวโลหะหนัก (McLellan และ Rock,1988)

Metal	1 hr adsorption		24 hr adsorption		Percent increase	
	50 mg/l	500 mg/l	50 mg/l	500 mg/l	50 mg/l	500 mg/l
Cd(mg/g)	3.1	4.8	3.8	5.8	22.6	20.8
Cr(mg/g)	1.0	12.0	4.7	29.0	370	142
Cu(mg/g)	6.3	17.0	6.8	23.0	7.5	35.3
Pb(mg/g)	14.3	38.0	19.1	40.0	33.6	5.26

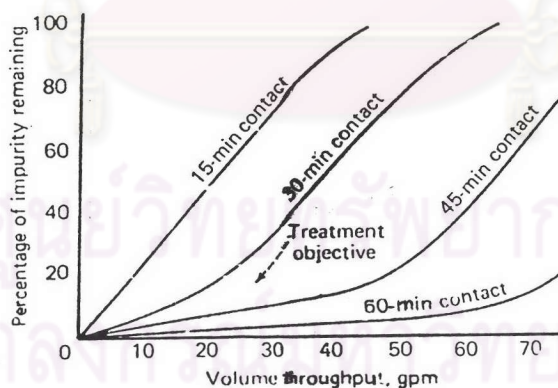
สำหรับการดูดติดผิวโดยการใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง พบว่า เกิดปัญหาเนื่องจากการอุดตันของสารแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอย และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในช่องว่างชั้นถ่าน ผลของการกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยมีค่าไม่แตกต่างกันนัก แต่ควรจะใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่งที่มีความหนาแน่นของการบรรจุคือน้อยซึ่งจะเกิดการอุดตันช้ากว่าถังที่มีความหนาแน่นในการบรรจุสูง

Netzer และ Hughes (1984) ได้ศึกษาการดูดติดของทองแดง ตะกั่ว และโคบอลต์ โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากบริษัท Barley Cheney, Calgon, ICI America, Westvaco และ Witco จากการทดลอง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากไม้เนื้อแข็งมีความสามารถในการดูดติดผิวโลหะทั้ง 3 ชนิดได้ดี และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดติดผิว คือ พีเอชเท่ากับ 4 เวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง การกำจัดทำได้ดีกว่าการกำจัดทองแดงถึง 2 เท่า และตะกั่วจะถูกกำจัดได้ดีกว่าโคบอลต์ ถึง 10 เท่า ในการใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณเท่าๆ กัน

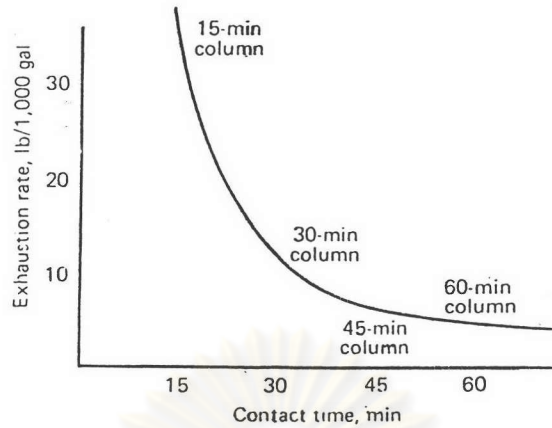
Oppole (1971) กล่าวว่า ความเข้มข้นของปรอทในน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการตกผลึก การกรองและการดูดติดผิวแล้ว สามารถลดปริมาณของปรอทจาก 30-50 ppb. เหลือ 3-5 ppb. โดยการลดพีเอชให้เหลือ 2 หรือ 4

Rizzo (1971) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตยาปราบศัตรูพืชที่มีความเข้มข้นของฟิโนลิกสูงถึง 200 มก./ล. โดยการบำบัดด้วยถังดูดติดผิวแบบแท่งซึ่งบรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 มีเวลาสัมผัส 140 นาที พบว่า ความเข้มข้นของฟิโนลิกในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าน้อยกว่า 1 มก./ล. และยังได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันซึ่งมี ซีโอดี อยู่ระหว่าง 250-450 มก./ล. ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb เวลาสัมผัสประมาณ 30 นาที สามารถที่จะลดซีโอดีได้น้อยกว่า 37 มก./ล. ซึ่งสามารถที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงย้อมสีพรม ความเข้มข้นของสีอินทรีย์เชิงซ้อนเริ่มต้น 200 มก./ล. หลังจากผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่มีเวลาสัมผัส 45 นาที น้ำที่ผ่านการบำบัดจะไม่เหลือสี และสารอินทรีย์ละลายในน้ำ

Rizzo และ Shepherd (1977) กล่าวว่า เวลาสัมผัสที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัตราที่สารปนเปื้อนถูกดูดติดบนผิวถ่าน ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการทดสอบทางพลศาสตร์ของถังดูดติดผิวแบบแท่งเท่านั้น จากลักษณะเบรคทอร์จจะทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้ ทำให้สามารถหาอัตราการใช้คาร์บอนได้ (น้ำหนักของคาร์บอนที่ใช้ต่อปริมาตรของน้ำเสียที่บำบัด) ด้วยข้อมูลนี้ จึงสามารถที่จะสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการใช้คาร์บอน กับเวลาสัมผัส แสดงดังรูปที่ 2.36 และ รูปที่ 2.37



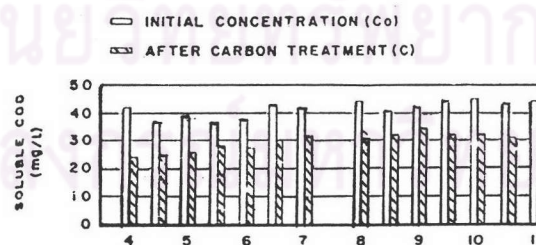
รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาสัมผัส (Rizzo and Shepherd, 1977)



รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้คาร์บอนกับเวลาสัมผัส (Rizzo and Shepherd, 1977)

Sigworth และ Smith (1972) ได้สรุปความสามารถในการดูดซับของโลหะต่างๆ ไว้ดังตารางที่ 2.37

Stukenberg (1975) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพเคมีโดยกระบวนการสร้างตะกอนและการดูดซับ (Coagulation-Adsorption Process) ผลจากการทดลองที่ได้ คือ ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ผงในการกำจัดซีโอดี จะได้ผลดีเมื่อพีเอชเท่ากับ 4 ดังรูปที่ 2.38 ซึ่งปริมาณของซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.18 mg COD/mg คาร์บอน ไม่มีผลกระทบจากของแข็งแขวนลอยต่อประสิทธิภาพของการดูดซับของคาร์บอน



รูปที่ 2.38 ผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดซีโอดี (Stukenberg, 1975)

ตารางที่ 2.37 ความสามารถในการดูดซับโลหะต่างๆ (Sigworth and Smith, 1972)

Metals of High Adsorption Potential

Symbol	Element	Toxicity	AWWA goal or Tentative Target	Potential for Removal by Carbon
Sb	Antimony	Probably high	None yet	High adsorbable in some solutions
As	Arsenic	high	50ppb	Good in higher oxidation states
Bi	Bismuth	Slight	None	Very good
Cr ⁺⁶	Chromium	High	10 ppb	Good, easily reduced
Sn	Tin	Nontoxic	None	Proven very high

Metals of Good Adsorption Potential

Symbol	Element	Toxicity	AWWA goal or Tentative Target	Potential for Removal by Carbon
Ag	Silver	Slight	50 ppb	Reduced on carbon surface
Hg	Mercury	Very high	5 ppb	CH ₃ HgCl adsorbed easily Metal filtered out
Co	Cobalt	Slight	None	Radioactive Co ⁶⁰ very dangerous Trace quantities readily adsorbed possibly as complexes
Zr	Zirconium	Low	None	Good at low pH

Elements of Fair-to-Good Adsorption Potential

Symbol	Element	Toxicity	AWWA goal or Tentative Target	Potential for Removal by Carbon
Pb	Lead	High	50 ppb	Good
Ni	Nickel	Slight	None	Fair
Ti	Titanium	Nil	None	Good
V	Vanadium	Slight	None	Variable
Fe	Iron	Nil	None	Fe ⁺³ good, Fe ⁺² poor but may oxidize

ตารางที่ 2.37 (ต่อ)

Elements of Low or Unknown Adsorption Potential

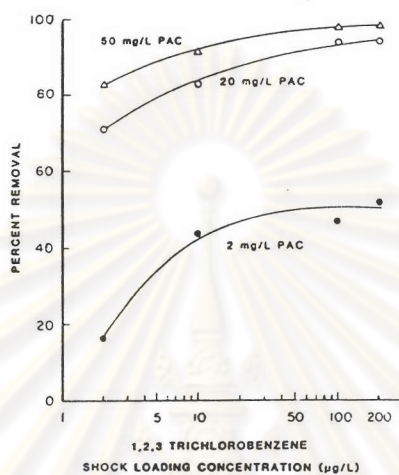
Symbol	Element	Toxicity	AWWA goal or Tentative Target	Potential for Removal by Carbon
Cu	Copper	Nil	200 ppb	Slight, possibly good if complexed
Cd	Cadmium	High	10 ppb	Slight
Zn	Zinc	Nil	1 ppm	Slight
Be	Beryllium	High	None	Unknown
Ba	Barium	High	1 ppm	Very low
Se	Selenium	High	10 ppb	Slight
Mo	Molybdenum	Slight	None	Slight at pH 6-8, good as complex ion
Mn	Manganese	Low		Not likely, except as MnO_4^-
W	Tungsten	Slight	None	Slight

Miscellaneous Inorganic Water Contaminants

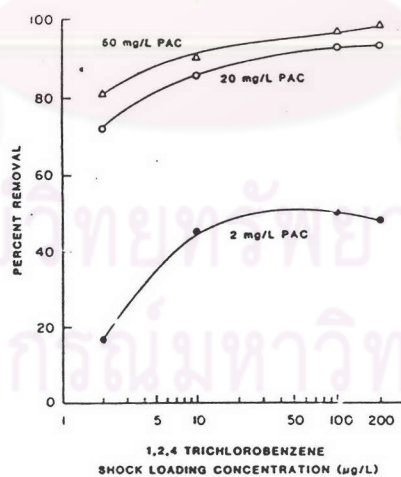
Substance	Remarks
Phosphorus	
P, free element	Not likely to exist in reduced form in water
PO_4^{3-} phosphate	Not adsorbed but carbon may induce precipitation of $Ca_3(PO_4)_2$ or $FePO_4$
Free halogens	
F_2 fluorine	Will not exist in water
Cl_2 chlorine	Adsorbed well and reduced
Br_2 bromine	Adsorbed strongly and reduced
I_2 iodine	Adsorbed very strongly, stable
Halides	
F^- Fluorine	May adsorb under special condition
Cl^- , Br^- , I^-	Not appreciably adsorbed

Thiem, Bakorek และ Alkhatib (1987) ศึกษาการดูดติดพิวปริมาณช็อกสารอินทรีย์ (Organic Shock Loadings) พบว่า ในการใช้ผงถ่านกัมมันต์ในการดูดปริมาณช็อกให้ผลที่ดีในการกำจัด 1,2,4 Trichlorobenzene, 1,2,3 Trichlorobenzene, Hexachloro-1, 3-butadiene (C-46), 1,2,4,5 Tetrachlorobenzene, Hexachlorocyclopentadiene (C-56) และ 1,2,3,4 Tetrachlorobenzene ดังแสดงในรูปที่ 2.39 ถึง 2.44 ปริมาณของผงถ่านกัมมันต์มากกว่า 50 มก./ล.อาจจะถูกใช้เพื่อลด

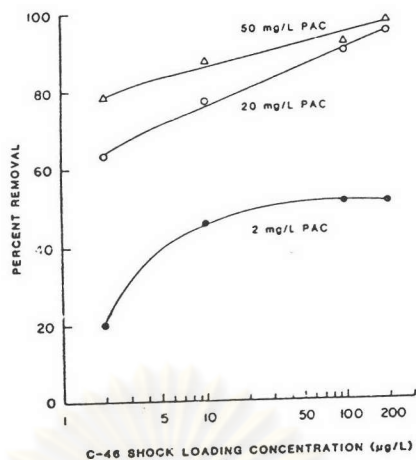
ปริมาณเชื้อของสารอินทรีย์เหล่านี้ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 100-200 ไมโครกรัม/ลิตร สำหรับการใช้ออกซิเจนแบบเมค พบว่าได้ผลดีเช่นเดียวกันในการกำจัดปริมาณเชื้อของสารอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิด ที่ความเข้มข้นต่ำ คือ 2-10 ไมโครกรัม/ลิตร และความเข้มข้นสูง 100-200 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาณที่กำจัดได้มากกว่า 99% และ 98% ตามลำดับ



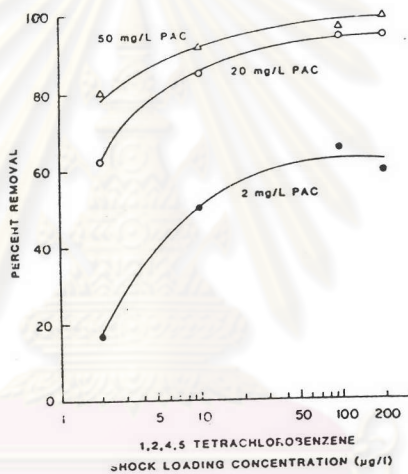
รูปที่ 2.39 การกำจัดปริมาณเชื้อของ 1,2,3 Trichlorobenzene (Thiem et al., 1987)



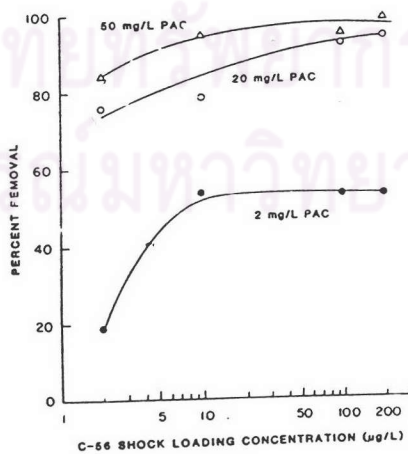
รูปที่ 2.40 การกำจัดปริมาณเชื้อของ 1,2,4 Trichlorobenzene (Thiem et al., 1987)



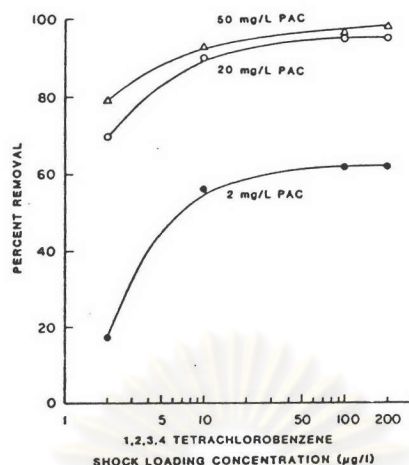
รูปที่ 2.41 การกำจัดปริมาณช็อคของ C-46 (Thiem et al., 1987)



รูปที่ 2.42 การกำจัดปริมาณช็อคของ 1,2,4,5 Tetrachlorobenzene (Thiem et al., 1987)



รูปที่ 2.43 การกำจัดปริมาณช็อคของ C-56 (Thiem et al., 1987)



รูปที่ 2.44 การกำจัดปริมาณช็อคของ 1,2,3,4 Tetrachlorobenzene (Thiem et al., 1987)

Wu (1978) กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.38 ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดที่ไอซี สี และฟีนอล จากตัวอย่างน้ำทั้งหมด 324 ตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรม 104 แห่ง พบว่า มากกว่า 3 ใน 4 ของน้ำตัวอย่างมีปริมาณที่ไอซีลดลงมากกว่า 85% และสีลดลงมากกว่า 95% ส่วนฟีนอลนั้น ลดลงมากกว่า 99% ในน้ำตัวอย่างที่มีฟีนอลปนอยู่

ตารางที่ 2.38 แสดงลักษณะโรงงานที่สามารถใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย (Wu, 1978)

Food and Kindred Products
Textile Mill Products
Dyeing and Finishing Textiles
Paper and Allied Products
Alkalies and Chlorine
Dyes, Dye Intermediates, and Organic Pigments
Industrial Organic Chemicals
Plastics and Synthetic Resins
Synthetic Rubber
Medicinal Chemicals
Pharmaceutical
Soaps and Detergents
Paints and Varnishes
Agricultural Chemicals
Explosives
Chemicals and Chemical Preparations
Petroleum Refining
Miscellaneous Plastics Products
Leather Finishing
Blast Furnaces, Including Ovens, Steel Works, and Rolling Mills
Steel Foundries
Trucking, e.g., Tank Car Washings