

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



#### 2.1 เบนซีน (BENZENE)

เบนซีนเป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของเหลวที่ไม่มีสี มีกลิ่นหวานของสารอโรมาติก ระเหยได้ง่ายและติดไฟได้ ซึ่งมีลักษณะคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเบนซีน (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

|  |  |
|--|--|
| ชื่อสามัญ  | Benzene  |
| Chemical Abstract Service Registry Number (CASRN)      | 71-43-2  |
| สูตรโมเลกุล  | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                  |
| สูตรโครงสร้าง  |  |
| น้ำหนักโมเลกุล   | 78.11  |
| จุดเดือด   | 80.1 °c  |
| จุดเยือกแข็ง   | 5.5 °c   |
| จุดวาบไฟ   | -11 °c   |
| อุณหภูมิติดไฟได้เอง                                    | 632.5 °c                                       |
| ช่วงความเข้มข้นที่ติดไฟ                                | 1.3-7.1 % ในอากาศ                              |
| ความดันไอ (ที่ 25 °c)                                  | 90.76 มม.ปรอท                                  |
| การละลายน้ำ (ที่ 25 °c)                                | 1,718 mg/l                                     |
| ความถ่วงจำเพาะ (ที่ 20 °c)                             | 0.8765   |
| Harry's Law Constant (ที่ 25 °c)                       | 5.55x10 <sup>-3</sup> atm m <sup>3</sup> /mole |
| n-octanol water partition coefficient, K <sub>ow</sub> | 1.32x10 <sup>2</sup>                           |
| ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ, K <sub>oc</sub>              | 83   |

### 2.1.1 การใช้งาน

การใช้งานของเบนซินส่วนใหญ่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น สไตรีน (styrene) ฟีนอล (phenol) บางส่วนใช้เป็นตัวทำละลาย (solvent) ในอุตสาหกรรมผลิตเรซิน ผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมยาง ผลิตภัณฑ์พลาสติก การทำหนังเทียม และใช้เป็นสารทำความสะอาด

### 2.1.2 ความเป็นพิษของเบนซิน

เบนซินเป็นสารที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำกว่าสารในกลุ่มเดียวกัน แต่ก็มีความเป็นพิษที่รุนแรงและพิษเฉียบพลันจากการรับทางผิวหนัง ซึ่งขึ้นกับปริมาณและระยะเวลาที่ได้รับโดยแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของเบนซินในอากาศที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

| ความเข้มข้นของเบนซิน (ppm) | ระยะเวลาที่ได้รับ | ความรุนแรงของอาการพิษ              |
|----------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 20,000                     | 5-10 นาที         | ทำให้ตายได้                        |
| 7,500                      | 30 นาที           | เป็นอันตรายต่อชีวิต                |
| 1,500                      | 60 นาที           | ทำให้เกิดอาการพิษต่างๆ อย่างรุนแรง |
| 500                        | 60 นาที           | ทำให้เกิดอาการพิษต่างๆ             |
| 50-150                     | 5 ชั่วโมง         | ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย                 |
| 25                         | 8 ชั่วโมง         | ไม่มีอาการที่สังเกตได้             |

พิษเฉียบพลันที่แสดงอาการจากการกินหรือดื่มเบนซินในปริมาณที่สูงกว่า 8.8 กรัม จะมีอาการเดินเซ อาเจียน เยื่อจมูกอักเสบ ซึ่พจรสั้นถี่และง่วงนอน หมดสติและตาย ตามลำดับ สำหรับการสัมผัสทางผิวหนังก่อให้เกิดอาการระคายเคืองผิวหนังบวมแดง ปวดแสบปวดร้อนตรงบริเวณที่สัมผัสกับเบนซิน ส่วนพิษเรื้อรังจะเป็นผลทำให้เกิดพิษต่อไขกระดูกและการสร้างเม็ดเลือด รวมถึงการเป็นสารก่อมะเร็งเม็ดเลือดขาวและสารก่อเกิดการกลายพันธุ์

สำหรับค่ามาตรฐานความเข้มข้นของเบนซีนที่ยอมให้มีได้ในน้ำใต้ดินของกรมควบคุมมลพิษ คือ ไม่เกิน 0.5  $\mu\text{g/l}$  และมาตรฐาน US.EPA. ยอมให้มีความเข้มข้นของเบนซีนในน้ำดื่มได้ไม่เกิน 5  $\mu\text{g/l}$  สำหรับค่าความเข้มข้นของเบนซีนที่ยอมให้มีได้ในดินตามมาตรฐาน US.EPA. เป็น 0.5 mg/Kg

## 2.2 กลไกการเคลื่อนที่ในชั้นน้ำใต้ดิน

กระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินแบ่งเป็น 3 กระบวนการหลัก ๆ คือ

1. กระบวนการทางชลศาสตร์ (Hydrodynamic Processes)
2. กระบวนการทางเคมี (Abiotic or Chemical Processes)
3. กระบวนการทางชีววิทยา (Biotic Processes)

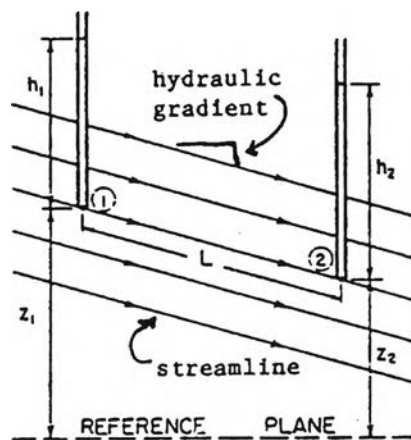
### 2.2.1 กระบวนการทางชลศาสตร์ (Hydrodynamic Processes)

เป็นการเคลื่อนที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน โดยประกอบด้วย

#### 2.2.1.1 การพา (Advection Processes)

เป็นการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน โดยความเร็วจะขึ้นอยู่กับค่าความชันของการไหล (hydraulic gradient) ตามกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังสมการที่ (2.1)

$$q = -KS = -K \frac{dh}{dl} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 ลักษณะของค่าความชันการไหล (hydraulic gradient) (Knox และคณะ, 1993)

เนื่องจากการไหลในชั้นน้ำใต้ดินตัวกลางมีลักษณะเป็นรูพรุน ความเร็วในชั้นน้ำใต้ดินมีค่า ดังสมการที่ (2.2)

$$v = \frac{q}{n} \quad (2.2)$$

โดยที่

- $q$  = ความเร็วในน้ำใต้ดิน (Darcy velocity)(L/t)
- $v$  = ความเร็วน้ำใต้ดินผ่านตัวกลาง (seepage or pore water velocity)(L/t)
- $S = \frac{dh}{dl}$  = ค่าความชันของการไหล (hydraulic gradient)(L/L)
- $K$  = ค่าความนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity)(L/t)
- $n$  = ค่าความพรุน (porosity)

### 2.2.1.2 การแพร่และการกระจายตัว (Diffusion and Dispersion Processes)

การแพร่และการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในระดับโมเลกุล โดยจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ตามปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. การแพร่ ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) โดยจะเคลื่อนที่จากที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยการเคลื่อนที่นี้จะไม่ขึ้นกับความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน
2. การกระจายตัว ซึ่งเป็นผลจากการกระจายตัวด้วยความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดิน

ซึ่งเกิดในช่องว่างของรูพรุนชั้นดิน (pore) โดยเกิดจากความแตกต่างระหว่างขนาดของช่องว่างของชั้นดิน

3. การกระจายตัวซึ่งเป็นผลจากทิศทางการไหลคดเคี้ยวของน้ำใต้ดิน (tortuosity of path) โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว จากสมการที่ (2.3)

$$D_h = \alpha v + D_d \quad (2.3)$$

โดยที่

- $D_h$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (dispersion coefficient)(L<sup>2</sup>/t)
- $\alpha$  = ค่าคงที่การกระจายตัว (dispersivity)(L)
- $v$  = ความเร็วน้ำใต้ดินผ่านตัวกลาง (pore water velocity)(L/t)
- $D_d$  = ค่าการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion)( L<sup>2</sup>/t)

จากการศึกษาแบบคอลัมน์ (Column Test) ในห้องปฏิบัติการชี้ให้เห็นว่า การกระจายตัวเป็นฟังก์ชันของความเร็วในการไหล เรียกว่า ค่าคงที่การกระจายตัว (dispersivity,  $\alpha$ ) โดยทั่วไปค่า  $D_d$  จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพจน์แรก ( $\alpha v$ ) เว้นแต่ในกรณีที่ค่าคงที่การกระจายและค่าความนำชลศาสตร์มีค่าน้อย จึงจะพิจารณาค่าการแพร่ของโมเลกุลเป็นสำคัญ การแพร่มักจะมีผลแต่ในกรณีที่มีความเร็วในการไหลต่ำ

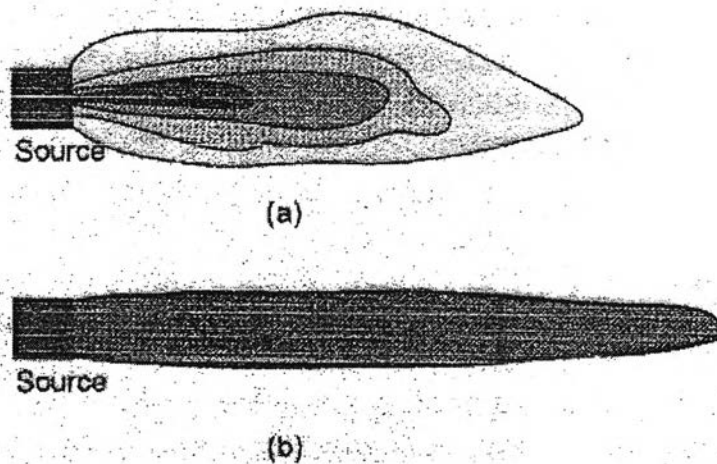
โดยการเคลื่อนที่ของมวล (Mass Transport) ของการแพร่ได้ผิวดินในรูป 1 มิติ (One Dimension) สามารถอธิบายด้วยกฎการแพร่ข้อแรกของ Fick (Fick's first Law of Diffusion) ในสมการที่ (2.4)

$$F_x = -D_d \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.4)$$

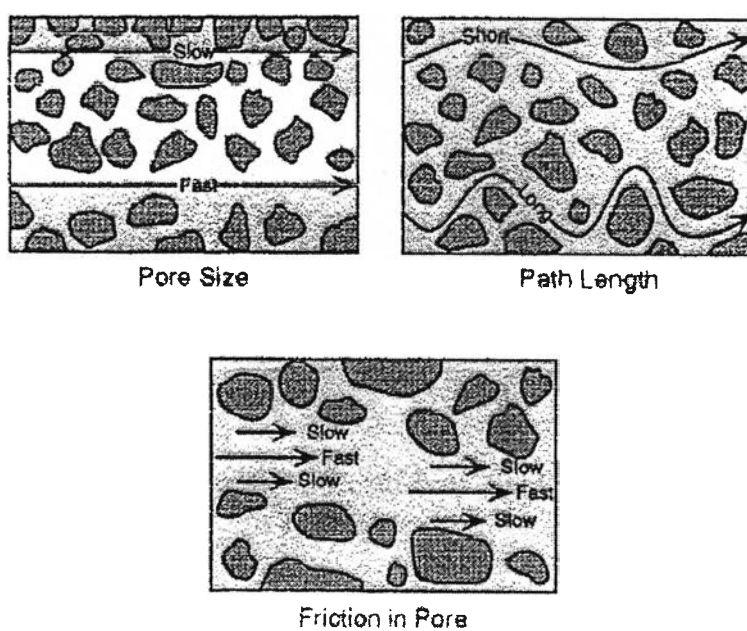
โดยที่

- $F_x$  = mass flux (M/L<sup>2</sup>T)
- $D_d$  = diffusion coefficient (L<sup>2</sup>/T)
- $\frac{\partial c}{\partial x}$  = concentration gradient (M/L<sup>3</sup>-L)

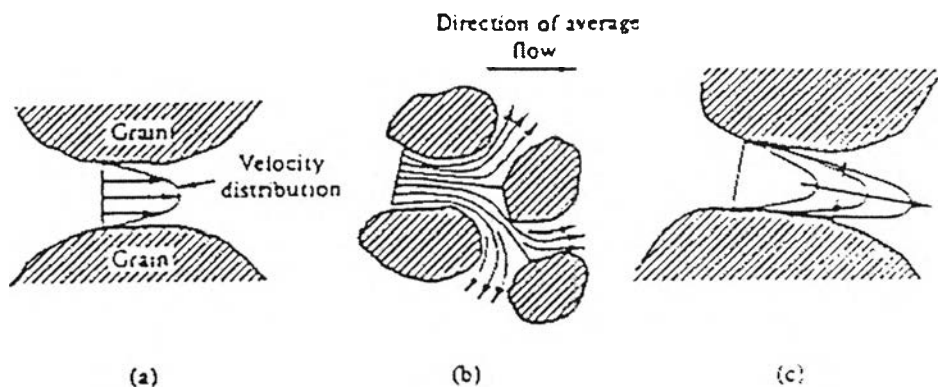
ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนตามกลไกต่างๆ ที่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.2 ถึง 2.4



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเคลื่อนที่ของ (a) การพาและการแพร่กระจายตัว (b) การพาตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน (Phillip และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวตามยาว (longitudinal dispersion) ของสารปนเปื้อนในตัวอย่างที่มีรูพรุน (Phillip และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ (a, b) การพาและกระจายตัวตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน (c) การพาและการแพร่ (Knox และคณะ, 1993)

## 2.2.2 กระบวนการทางเคมี (Abiotic or Chemical Processes)

กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำใต้ดิน เป็นผลจากการทำปฏิกิริยาของสารปนเปื้อนกับวัสดุในชั้นน้ำใต้ดิน หรือการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อน โดยพบว่าเบนซินไม่มีปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยแสง (Photodegradation) และการแตกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) แต่จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) โดยปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดินที่ช่วยดูดซับสารปนเปื้อนติดอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้ลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

### 2.2.2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของแข็งหรือของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

สารปนเปื้อนอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ละลายในน้ำใต้ดินหลายๆ ชนิด สามารถถูกแยกออกจากสารละลายโดยกระบวนการดูดซับ โดยสารปนเปื้อนในรูปสารละลายนี้จะถูกกักในบวมผิวช่องว่างรูพรุนของดินในชั้นดินอุ้มน้ำ (Aquifer Matrix) ทำให้สารปนเปื้อนที่ละลายในน้ำใต้ดินจะ

ถูกแยกออกจากสารละลายบางส่วน ส่งผลให้การเคลื่อนที่ถูกหน่วงไว้ ทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนทำได้ช้าลง

#### 2.2.2.2 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

กระบวนการดูดซับ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแรงที่มาเกี่ยวข้อง

การดูดซับทางกายภาพบนของแข็งเชื่อว่าเป็นคุณสมบัติของแรงระหว่างผิวหน้าของของแข็งกับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) และแรงกระจาย (Dispersion Forces) แรงกระจายมีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิดและเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดซับจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (Multilayers) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลที่อยู่ก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น

การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและสารดูดซับเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนรูปของพันธะเคมีระหว่างสารดูดซับกับผิวหน้าของของแข็ง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะเคมี มักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีความสัมพันธ์กับพลังงานการกระตุ้น (Activation Energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ และไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้บนพื้นผิวได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับและเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) สามารถแยกออกจากการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เมื่อมีความเป็นไปได้ตามข้อใดข้อหนึ่ง ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ เป็นแรงที่เกี่ยวกับสารชนิดเดียวที่สามารถเกิดย้อนกลับได้ กล่าวคือ สามารถเกิดการคายสารออก (Desorption) ได้ที่อุณหภูมิเดียวกันแม้กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากกระบวนการแพร่ โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับการแบ่งถ่าย



หรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีและไม่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ (Irreversible)

2. การดูดซับทางกายภาพ ไม่เจาะจงบริเวณที่จะเกิดการดูดซับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายได้ตลอดทั้งพื้นผิว สามารถวัดพื้นที่ของของแข็งของสารดูดซับได้ในทางตรงกันข้าม การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับเฉพาะที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีจะติดอยู่กับบริเวณที่เจาะจงให้เกิดการดูดซับเท่านั้น

3. ความร้อนที่เกิดขึ้นของการดูดซับทางกายภาพ จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางเคมี ซึ่งขีดจำกัดบนสุดยอดของการดูดซับทางกายภาพอาจสูงกว่า 20 kcal/mol ของสารที่ถูกดูดซับที่มีรูพรุนเล็กมากๆ ส่วนความร้อนการดูดซับทางเคมีอยู่ในช่วงค่าที่สูงกว่า 100 kcal/mol และต่ำกว่า 20 kcal/mol

### 2.2.2.3 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับของสารละลายเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่บนผิวหน้าของตัวดูดซับ เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นสารละลายที่ถูกดูดซับจะมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งหนึ่ง สารละลายจะเกิดการดูดซับและหลุดออกมาในจำนวนเท่า ๆ กันที่เวลาเดียวกัน จนกว่าจะเกิดสภาวะสมดุล ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารดูดซับในสารละลายอีกต่อไป

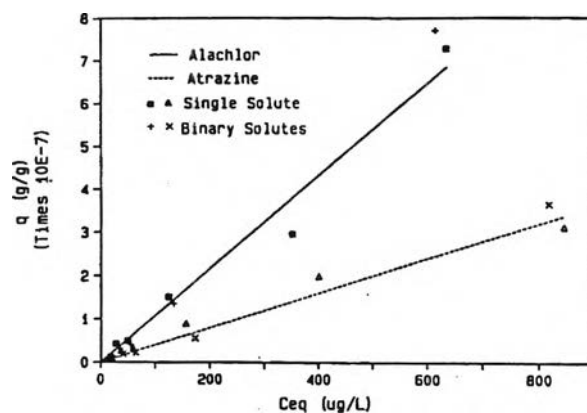
โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับในรูพรุนของดินในชั้นดินอุ้มน้ำ มักสมมติในเงื่อนไขที่สภาวะสมดุล ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วสัมพัทธ์เพียงพอกับความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อที่สามารถออกแบบระบบบำบัดได้ในกรณีเช่นนี้ โดยการแสดงปริมาณสารดูดซับที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวดูดซับในแง่ของความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งจะกล่าวถึงแต่ละแบบจำลองโดยสังเขป ดังนี้

#### 1. ไอโซเทอมแบบเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm)

เป็นการอธิบายสมดุลของการดูดซับที่ง่ายที่สุดโดยปริมาณของสารที่ถูกดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ดังสมการ (2.5)

$$S = K_d C \quad (2.5)$$

โดยที่ S คือ ปริมาณสารดูดซับบนตัวกลาง (mg/kg)  
 $K_d$  คือ ค่าคงที่ของการกระจาย  
 C คือ ความเข้มข้นของสาร (mg/L)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของไอโซเทอมแบบเชิงเส้น (Knox และคณะ, 1993)

## 2. ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

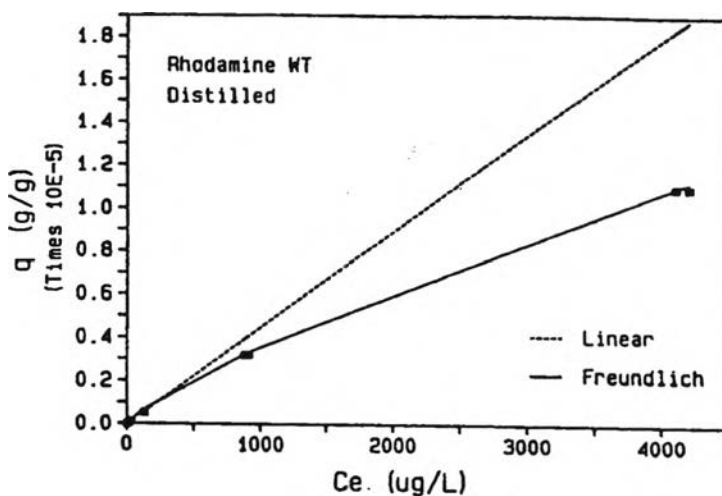
สมการของแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวที่จำกัดของการดูดซับ
2. แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer)
3. พื้นที่ในแต่ละแห่งจะถูกจำกัดปริมาณของสารดูดซับด้วยสภาพทางเรขาคณิตของพื้นผิวนั้นๆ
4. พลังงานในการดูดซับจะมีค่าเท่ากันในทุกบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ นอกจากนั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นผิวของตัวดูดซับหรือข้ามไปยังโมเลกุลอื่นได้

สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir) แสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

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

โดยที่  
 $X = x/m$  หรือปริมาณของสารดูดซับ ( $x$ ) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $m$ )  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)  
 $X_m$  = ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ต้องการ  
 สำหรับความสามารถในการเกิด Monolayer  
 $b$  = ค่าคงที่ของระบบ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของไอโซเทอมแบบเชิงเส้นและฟรอนด์ลิช (Knox และคณะ, 1993)

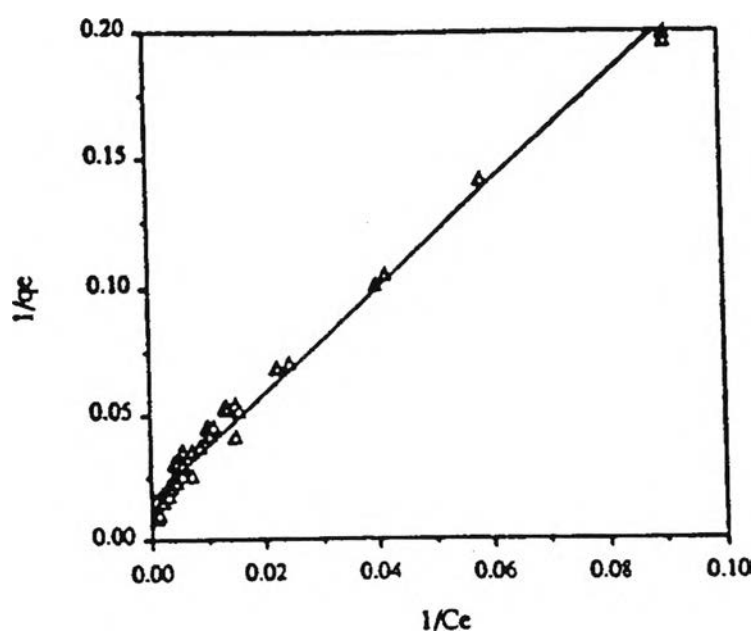
### 3. ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการของฟรอนด์ลิช (Freundlich) เป็นสมการการดูดซับทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$x/m = K C_e^{1/n} \quad (2.7)$$

โดยที่  $x$  = น้ำหนักของสารดูดซับ (mg)  
 $m$  = น้ำหนักของตัวดูดซับ (kg)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสาร (mg/l)  
 $K, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ

ค่าคงที่ของแต่ละไอโซเทอม สามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารละลายที่ได้จากการทดลองแบบกะ (batch experiment) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5 ถึง 2.7

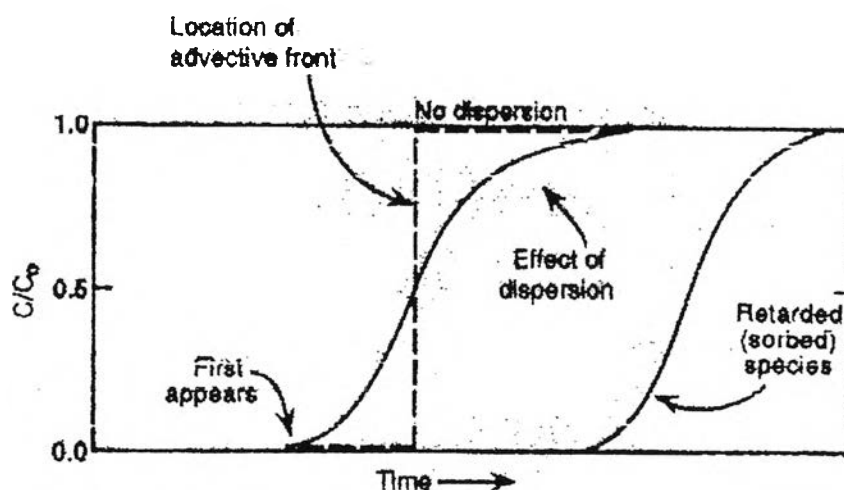


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Knox และคณะ, 1993)

การดูดซับทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ได้ช้าลง และเมื่อความเร็วเฉลี่ยของสารปนเปื้อนน้อยกว่าความเร็วของน้ำในช่องว่างรูพรุน (pore water velocity) ของน้ำใต้ดินนั้นคือสารปนเปื้อนละลายจะถูกหน่วงให้การเคลื่อนที่ช้าลง ดังรูปที่ 2.8 โดยพิจารณาจากค่าการหน่วงการเคลื่อนที่ (Retardation Factor; R) ดังสมการที่ (2.8)

$$R = 1 + (\rho/n)K_d \quad (2.8)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นแห้งของดิน ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $n$  = ความพรุนของดิน  
 $K_d$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ



รูปที่ 2.8 Breakthrough Curve แสดงให้เห็นถึงผลของการกระจายตัวและการดูดซับ (Phillip และคณะ, 1994)

### 2.2.3 กระบวนการทางชีววิทยา (Biotic Processes)

เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยจุลินทรีย์ซึ่งสามารถเกิดได้ในสภาวะมีออกซิเจน (aerobic) และไม่มีออกซิเจน (anaerobic) ซึ่งจะให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือ catechol (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) โดยจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเบนซีน คือ แบคทีเรียประเภท ซูโดโมแนส (*Pseudomonas*) อัตราการย่อยสลายเป็นแบบลำดับที่ศูนย์และหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในพื้นที่นั้นๆ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการย่อยสลายของเบนซีนที่สถานที่ต่าง ๆ (Knox และคณะ, 1993)

| ชนิดของตัวอย่างและสถานที่                                  | ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์หลัก | อัตราการย่อยสลายทางชีววิทยา  |
|--|--------------------------|--|
| 1. ทราบจากบ่อน้ำตื้น<br>ที่เมือง Conroe<br>สหรัฐอเมริกา    | ออกซิเจน                 | น้อยกว่า 0.03 ต่อสัปดาห์   |
| 2. ทราบจากชั้นน้ำใต้ดิน<br>ที่เมือง Borden แคนาดา          | ออกซิเจน                 | 0.1 ต่อสัปดาห์ ในห้องปฏิบัติการ<br>0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร-สัปดาห์ ที่<br>พื้นที่สนาม |
| 3. ทราบจากชั้นน้ำใต้ดิน<br>ที่เมือง Norman<br>สหรัฐอเมริกา | ออกซิเจน                 | 0.2 ต่อสัปดาห์   |
| 4. ทราบจากชั้นน้ำใต้ดิน<br>ลึก 5 เมตร                      | ออกซิเจน                 | 2.3 - 2.7 ต่อสัปดาห์   |
| 5. ทราบจากชั้นน้ำใต้ดิน<br>ลึก 3 เมตร                      | คาร์บอนเนต               | 0.9 ต่อสัปดาห์   |
| 6. ดินโคลน (Alluvium)<br>ที่เมือง Norman<br>สหรัฐอเมริกา   | คาร์บอนเนต               | 70-74% ถูกกำจัดในเวลา 40<br>สัปดาห์ และ 99% ใน 120สัปดาห์                          |

### 2.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติ (one dimension model)

แบบจำลองการเคลื่อนที่อยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อมีการอัดตัว
2. ตัวกลางมีคุณสมบัติเหมือนกันและมีเนื้อเดียวกัน
3. พิจารณาเฉพาะการไหลผ่านตัวกลางอัดตัว
4. การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state flow) และเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยได้ประยุกต์รวมสมการการเคลื่อนที่ของการพา การกระจายตัว และจลนพลศาสตร์ของสมการโมนอด (Monod) ดังสมการที่ (2.9)

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + \mu c + \gamma = R \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.9)$$

โดยที่

- C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (mg/l)
- v = ความเร็วน้ำใต้ดินผ่านตัวกลาง (L/t)
- D = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ( $L^2/t$ )
- X = ทิศทางของการไหล
- $\mu$  = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (First order rate constant)
- $\gamma$  = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ (Zero order rate constant)
- R = ค่าคงที่ของการหน่วง (Retardation factor)

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schwarzenbach และ Westall(1981) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจากน้ำผิวดินสู่น้ำใต้ดิน ซึ่งพิจารณาถึงกลไกการดูดซับพบว่า การดูดซับเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Isotherm) และค่า organic - carbon content ที่มีค่ามากกว่า 0.1% จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ

Chiou และคณะ, (1983) ได้ทำการศึกษาสมมูลของการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ไม่มีขั้ว 12 ชนิดในน้ำด้วยดิน ได้แก่ เบนซีน (benzene) แอนนิโซล (anisole) ครอโรเบนซีน (chlorobenzene) เอธิลเบนซีน (ethylbenzene) 1,2-ครอโรเบนซีน (1,2-dichlorobenzene) 1,3-ครอโรเบนซีน (1,3-dichlorobenzene) 1,4-ครอโรเบนซีน (1,4-dichlorobenzene) 1,2,4-ครอโรเบนซีน (1,2,4-trichlorobenzene) 2-PCB 2,2'-PCB 2,4'-PCB และ 2,4,4'-PCB โดยดินที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเป็นดินร่วน (loam soil) ได้ศึกษาทั้งในรูปของสารละลายเดี่ยว (single solute) และสารละลายผสม (binary solute) พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับทั้งสองรูปแบบเป็นแบบเชิงเส้นและไม่มีการขัดขวางซึ่งกันและกันในการดูดซับของสารละลายผสม

Misra(1993) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของเบนซีนในคอลัมน์ดินและศึกษาการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซีนในการทดลองแบบกะ (batch experiment) พบว่าอัตราการย่อยสลายเป็นแบบลำดับที่หนึ่งมีค่า  $0.146 - 0.448$  ต่อวัน และอัตราการย่อยสลายลำดับที่ศูนย์มีค่า  $0.94 - 2.0$  มิลลิกรัมต่อลิตร - วัน ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ (column experiment) ดูการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม CXTFIT พบว่า การเคลื่อนที่ของเบนซีนขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของการไหล

Patterson และคณะ, (1993) ได้ศึกษาการย่อยสลายและการหน่วงเตตระคลอโรอีเทน (PCE) และสารประกอบเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีนแลโซลิน (BTEX) จากดินภาคพื้นสนามที่เมือง Swan Coastal Plain ประเทศออสเตรเลีย โดยทำการทดลองด้วยคอลัมน์ดินทรายที่ไม่มีการปนเปื้อน จากการทดลองพบว่า จุลินทรีย์ดั้งเดิมในดินสามารถย่อยสลายได้ และเบนซีนจะคงสภาพได้ในสภาวะไร้อากาศ ปฏิกริยาการย่อยสลายเป็นแบบลำดับขั้นที่หนึ่ง โดยมีอัตราการย่อยสลายมากกว่า  $1.1 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที

Corsevil และ Weber Jr.(1994) ได้ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการย่อยสลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนวงแหวนด้วยจุลินทรีย์ดั้งเดิมของดินในชั้นน้ำใต้ดิน พบว่าอุณหภูมิและความเร็วของการไหลมีผลต่อการย่อยสลาย

Nielson และ Christensen(1994) ศึกษาตัวแปรการย่อยสลายของสารประกอบวงแหวนไฮโดรคาร์บอนจากดินตัวอย่าง 8 พื้นที่ พบว่า เบนซีนมีช่วงปรับสภาพ (lag phase) สูงสุดไม่เกิน 9 วัน และย่อยสลายหมดใน 30 วัน โดยอัตราการย่อยสลายต่างกันตามพื้นที่ของดินและองค์ประกอบของดิน

Barden และคณะ, (1997) ได้ทำการศึกษาและสังเกตการณ์ถึงการย่อยสลายทางชีววิทยาของ จุลินทรีย์ดั้งเดิมในดิน พบว่าปฏิกริยาการย่อยสลายแบบลำดับที่หนึ่ง โดยมีอัตราการย่อยสลายเป็น  $0 - 0.0010$  ต่อวัน ของ MTBE และ  $0.0006 - 0.0014$  ต่อวัน ของเบนซีน

Mohammed และ Allayia(1997) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่และการย่อยสลายทางชีววิทยาของสารประกอบเบนซีน โทลูอิน และโซลิน (BTX) ในชั้นน้ำใต้ดินอิมตัวที่มีลักษณะดินเป็นดินทรายโดยให้การเคลื่อนที่เป็นแบบ 1 มิติ ที่ขึ้นกับค่าความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดิน



พบว่า เบนซีนมีค่าคงที่ความหน่วงเป็น 1.04 ค่าอัตราการย่อยสลายแบบลำดับที่หนึ่ง มีค่า 0.052 ต่อวัน

Yerushalmi และ Guiot(1998) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายทางชีววิทยาของน้ำมันแก๊สโซลีนที่มีเบนซีน โทลูอีน และเอทิลเบนซีน (BTE) เป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าการย่อยสลายของเบนซีนที่ความเข้มข้น 16.1 – 660 มิลลิกรัมต่อลิตรเกิดขึ้นสมบูรณ์ใน 2.5 ถึง 16 วัน โดยไม่มีผลผลิตอื่นเกิดขึ้น และมีค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด 0.72 – 5.04 ต่อวัน

Fortin และคณะ, (1998) ได้ทำการศึกษาถึงการละลายของไซลีน (xylene) และไดโครโรเบนซีน (dichlorobenzene) ที่ถูกดักไว้ในคอลัมน์ทราย (sand column) ภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ของสารทั้งสองที่มีค่าความหนาแน่นและความหนืดต่างกัน พบว่าไซลีน (xylene) และไดโครโรเบนซีน(dichlorobenzene) ถูกดักไว้ในทรายหายาบโดยเฉลี่ย 12.8% และ 13.6% ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่ของสารที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ พบว่า มีการเคลื่อนที่บางส่วนอันเนื่องมาจากการไหลผ่านของน้ำที่ผ่านรูพรุนของทราย ซึ่งการเคลื่อนที่ของสารที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจะเคลื่อนที่ได้สูงสุดเท่ากับค่าความสามารถในการละลาย (aqueous solubility)

Schirmer และคณะ, (1999) ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินค่าการลดลงของเบนซีน และ MTBE จากการย่อยสลายทางชีววิทยาและการกระจายตัวที่เมือง Borden ประเทศแคนาดา โดยการทดลองภาคสนาม พบว่า การลดลงของสารปนเปื้อนที่มีนัยสำคัญ คือ การย่อยสลายทางชีววิทยาและการกระจายตัว และการระเหยกลายเป็นไอและการฟื้นฟูด้วยพืช (Phytoremediation) ไม่มีผลต่อการลดลงของสารปนเปื้อน ส่วนการดูดซับมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการกระจายตัว ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่า การย่อยสลายของสารปนเปื้อนเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง โดยเบนซีนมีค่า 0.003 ต่อวัน และMTBE มีค่า 0.0012 ต่อวัน

Prommer และคณะ, (1999) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Petroleum Hydrocarbon) ในชั้นน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติที่ได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบทางด้านเคมีและการย่อยสลายทางชีววิทยาด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ PHREEQC โดยเลือกระยะเวลาการเคลื่อนที่เป็น 18 80 และ 240 วัน ที่มีเงื่อนไขเริ่มต้นไม่มีสารละลายอินทรีย์ จนกระทั่งน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ปนเปื้อนที่มีสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำ (NAPL) จนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady) พบว่า เบนซีนและโทลูอีนมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น เมื่อ

ครบกำหนดเวลาที่ทดลองพบว่า วันที่ 18 เกิดการเปลี่ยนสถานะจากดีไนตริไฟอิงค์ (Denitrifying) เป็นซัลเฟตรีดิวซิงค์ (Sulphate – reducing) เกิดซัลไฟด์ วันที่ 80 เป็นสถานะซัลเฟตรีดิวซิงค์ (Sulphate – reducing) และยังคงมีการเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ วันที่ 240 ไม่มีการย่อยสลายทางชีววิทยาแต่ยังคงมีการเคลื่อนที่ และในการศึกษาครั้งนี้ยังพบอีกว่า การย่อยสลายของโทลูอิน เอธิลเบนซีน และไซลีน มีค่าน้อยกว่าการย่อยสลายของเบนซีน

Franzmann และคณะ, (2002) ได้ทำการศึกษาโดยการทำการฟื้นฟูภาคสนามที่เมือง Swan Coastal Plain ประเทศออสเตรเลีย โดยใช้จุลินทรีย์แบบดั้งเดิม โดยปรับให้มีสถานะเป็นปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน โดยให้จุลินทรีย์ตัวใหม่ คือ *Desulfosporosinus Meridiei* เป็นตัวหลักในการย่อยสลายพบว่า การเคลื่อนที่เป็นแบบทางกายภาพและความสามารถย่อยสลายเป็นตัวหนึ่งของการเคลื่อนที่อย่างมีนัยสำคัญ

Zheng และคณะ, (2002) ได้ศึกษาการดูดซับและการย่อยสลายทางชีววิทยาในสถานะไม่มีออกซิเจนของสารวงแหวนไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินในการทดลองแบบคอลัมน์ (Column Experiment) ที่บรรจุดินตะกอนจากพื้นที่ปนเปื้อนเมือง Garder ประเทศนอร์เวย์ ซึ่งทำการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิ 10 ° C โดยสารปนเปื้อนที่พิจารณา คือ โทลูอิน และ 1,2,4 – ไตรเมธิลเบนซีน พบว่า การลดลงของค่าความเร็วเฉลี่ยในการไหลผ่านรูพรุนของน้ำใต้ดิน มีผลทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีววิทยามีค่าสูงขึ้น