

การเคลื่อนตัวและการย่อยสลายทางชีวภาพของเบนซีน ในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว

วัสตา กงนกร¹ เขมรัฐ โอสถาพันธ์² และ สุธา ขาวเจียร³

Abstract

Khongnakorn, W.¹, Osathaphan, K.² and Khaodhiar, S.²

Transport and biodegradation of benzene in the saturated groundwater layer

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(Suppl. 1) : 143-150

The objective of this study was to investigate the biotic and abiotic processes that affected benzene transportation in the saturated groundwater layer. The study was performed in the laboratory using synthetic groundwater and soil sample from Maptaput Industrial Estate, Rayong. This study was divided into 3 parts; batch test, column test and computer modeling. The biotic, biodegradation, and the abiotic processes were studied in the batch system. The column experiment was performed to investigate the transport behavior of benzene. The computer program, CXTFIT, with parameters acquired from batch and column experiments was used to simulate the benzene transport behavior.

¹Faculty of Technology and Management, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani 84100 Thailand. ²Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phaya Thai, Bangkok 10330 Thailand.

¹M.Eng.(Environmental Engineering), คณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100 ²Ph.D.(Environmental Engineering), ³Ph.D.(Environmental Engineering), ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท กรุงเทพฯ 10330

Corresponding e-mail: watsa@ratree.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 11 มีนาคม 2547

รับลงพิมพ์ 16 พฤษภาคม 2547

It was found that benzene adsorption followed the linear adsorption isotherm with its coefficient (K_d) of $0.544 \text{ cm}^3/\text{g}$ and the retardation factor of 5.43. The biodegradation rate could be estimated using the first-order biodegradation rate equation with the degradation rate of 0.0009-0.0092 per day. The dispersion coefficient estimated from column experiments was $0.0102 \text{ cm}^2/\text{s}$. The results from computer simulation did not fit the experimental data well. It can be concluded that the transport of benzene was a non-equilibrium transport. It was also found that biodegradation of benzene had significant effect on benzene transportation in saturated groundwater. The simulated transport with biodegradation process fitted the data fairly.

Key words : benzene, transport, biodegradation, adsorption

บทคัดย่อ

วัสสา คจนคร เชมรัฐ โอสถาพันธุ และ สุธา ขาวเชียร
การเคลื่อนตัวและการย่อยสลายทางชีวภาพของเบนซินในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว
ว.สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(ฉบับพิเศษ 1) : 143-150

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลื่อนตัวของเบนซินในชั้นน้ำใต้ดิน รวมถึงความสามารถในการดูดซับของเบนซินบนผิวดินและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์เดิมที่มีในดิน ซึ่งทั้งสองปัจจัยช่วยในการลดความรุนแรงของการแพร่กระจายของเบนซินในชั้นน้ำใต้ดิน โดยใช้ดินในบริเวณเขตพื้นที่นครอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การทดลองแบบกะ การทดลองแบบคอลัมน์และการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CXTFIT) จำลองการเคลื่อนตัวของเบนซินในชั้นน้ำใต้ดิน

ผลการทดลองแบบกะ พบว่า ความสามารถในการดูดซับของเบนซินบนผิวดินที่สมดุลเป็นไอโซเทอมแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่การดูดซับเป็น $0.5444 \text{ ลบ.ซม./กรัม}$ ส่งผลให้ค่าคงที่ของการหน่วง (Retardation factor) เป็น 5.43 และปฏิกิริยาการย่อยสลายเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง โดยมีอัตราการย่อยสลายอยู่ในช่วง 0.0009-0.0092 ต่อวัน สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดินด้วยสารละลายโบรไมด์ พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบสมดุล มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.0088-0.0116 ตร.ซม./วินาที และผลจากการจำลองการเคลื่อนตัวของเบนซินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CXTFIT) มีความแตกต่างกับผลการทดลองจริงแบบคอลัมน์ ซึ่งน่าจะสามารถอธิบายได้ด้วยการเคลื่อนที่แบบไม่สมดุล ส่วนผลของการย่อยสลายทางชีวภาพมีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อการเคลื่อนตัวของเบนซิน และผลของแบบจำลองการเคลื่อนตัวของเบนซินที่มีกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพกับผลการทดลองจริงแบบคอลัมน์มีความใกล้เคียงกัน

ประเทศไทยมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ทำให้มีอัตราการใช้สารเคมีต่างๆ สูงขึ้น เบนซินเป็นสารเคมีตัวสำคัญที่มีอัตราการนำเข้าสูงถึง 48.06 ล้านกิโลกรัมในปี 2541 และยังคงมีอัตราที่เพิ่มสูงขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) โดยใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมีและเป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท ในการกำจัดกากของเสียหรือของเสียจากอุตสาหกรรมที่ไม่เหมาะสม รวมถึงการรั่วซึมของถังเก็บน้ำมันใต้ดินและการรั่วซึมของน้ำชะมูลฝอยเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของเบนซินในชั้นดินและชั้นน้ำ

ใต้ดิน โดยพื้นที่นครอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง เป็นเขตพื้นที่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนของเบนซินเนื่องจากมีกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากก๊าซธรรมชาติ เช่น โรงงานผลิตเม็ดพลาสติก โรงงานเคมีภัณฑ์ประเภทสารทำละลาย เป็นต้น รวมถึงลักษณะพื้นที่มีลักษณะเป็นแอ่งกระทะทำให้มีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสูงขึ้น การศึกษาการเคลื่อนที่ของเบนซินในชั้นน้ำใต้ดิน โดยใช้ดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดจึงมีความสำคัญ ทำให้ทราบถึงลักษณะการเคลื่อนที่ กลไกการลดความเข้มข้นของเบนซินตามธรรมชาติ รวมทั้งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัย

ไปใช้ในการตัดสินใจเลือกตำแหน่งของบ่อสังเกตการณ์ (Monitoring Well) ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

ในการเคลื่อนตัวของสารเคมีที่ปนเปื้อนในชั้นดิน และชั้นน้ำใต้ดินจากการฟื้นฟูในภาคสนามส่วนใหญ่ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินการเคลื่อนตัวและการลดลงของ สารปนเปื้อน คือ การกระจายตัว การดูดซับ และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Schirmer *et al.*, 1999; Franzmann *et al.*, 2002)

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่างดิน

นำดินตัวอย่างมาผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ โดยเลือกดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นำไปทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังนี้คือ ค่าความชื้น (moisture content; ASTM D2974-84), ปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอน (organic carbon content; Walkley-Black method), ความหนาแน่น (Bulk density), ค่าความพรุน (porosity), พีเอช (pH; ASTM D4972-95A) และความเข้มข้นเบนซีนในดิน (benzene; EPA method 3810/5000/5021)

2. การเตรียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์

สำหรับน้ำใต้ดินสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นเบนซีนที่ทำการศึกษานั่นเป็นน้ำใต้ดินเป็น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร ซึ่งเตรียมจากสารละลายเบนซีนมาตรฐาน (Supelco, USA) ที่ความเข้มข้น 1000 มก./ลิตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย โดยความเข้มข้นที่ทำการศึกษา

ได้เลือกจากความเข้มข้นของเบนซีนที่มีโอกาสรั่วจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน

3. การทดลองเพื่อหาไอโซเทอมของการดูดซับของเบนซีนบนผิวดิน

นำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และผ่านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclave) 3 กรัมแห้งของดินลงในหลอดไวอัล และเติมตัวอย่างน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่มีเบนซีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10 มล. แล้วรีบปิดทันทีเพื่อป้องกันการระเหย โดยมีหลอดควบคุมซึ่งเติมเฉพาะตัวอย่างน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่มีเบนซีนผสมเพียงอย่างเดียว เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมในการทดลอง แล้วนำหลอดไวอัลเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ตามเวลาที่ได้จากการทดสอบ kinetic test) ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณเบนซีนโดยวิธีการเทคนิคเฮดสเปซด้วยเครื่องแกสโครมาโตกราฟฟี (GC/FID; Agilent 6890N; HP1 (25 mm. × 0.32 μm.ID × 0.17 μm.)) โดยมีเงื่อนไขในการวิเคราะห์คือ Oven 40°C เพิ่มขึ้น 2°C/นาที จนถึง 50°C และอุณหภูมิสุดท้ายที่ 300°C ด้วยอัตรา 10°C/นาที, splitless injection ที่ 200°C และ detector 200°C

4. การทดลองเพื่อหาความสามารถในการปรับสภาพ และอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในดิน

เตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารอาหาร (Table 1) ชั่งตัวอย่างดิน 20 กรัม ใส่หลอดไวอัลขนาด 120 มล. โดยมีชุดทดลองที่ใช้ตัวอย่างดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรค (autoclave) เป็นตัวควบคุมในการ

Table 1. Composition of Mineral Salt Media (MSM) (Misra, 1993)

Chemical Formula	Concentration (mg/l)	Chemical Formula	Concentration (mg/l)
1. (NH ₄) ₂ SO ₄	2,380	8. MnSO ₄	1.54
2. KH ₂ PO ₄	1,360	9. Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	3.53
3. Na ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O	1,420	10. CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.039
4. KNO ₃	500	11. ZnCl ₂	0.021
5. MgSO ₄ ·7H ₂ O	50	12. CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.041
6. CaCl ₂	10	13. (NH ₄) ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.025
7. H ₂ BO ₃	2.86		

ทดลอง เติมหาสารละลายเชิงซ้อนลงในขวดเป็นปริมาณ 30 มล. และเติมน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่มีเบนซีนปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร ในปริมาตร 100 มล./ตัวอย่าง แล้วจึงเก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด โดยมีการเติมโซเดียมคลอไรด์รักษาสภาพ นำตัวอย่างไปหาปริมาณเบนซีนโดยวิธีการเทคนิคเฮดสเปซด้วยเครื่องแกสโครมาโตกราฟี

5. การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน

การทดลองแบบคอลัมน์ (column test) โดยคอลัมน์ ทำด้วยเทฟลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 ซม. ความสูง 20 ซม. ภายในบรรจุดินที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200 เป็นปริมาณ 180 ± 0.1 กรัม ดัง Figure 1 โดยน้ำจะถูกปั๊มผ่านคอลัมน์ดินแบบไหลขึ้น (up flow) โดยควบคุมอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 10 มล./ชม. เพื่อให้มีความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดินคงที่ 2 ซม./ชม. จนดินในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจึงป้อนสารละลายโบรไมด์ความเข้มข้น 10 มก./ลิตร เข้าสู่คอลัมน์ดิน ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 10 มล./ชม. เก็บน้ำที่ทางออกตามช่วงเวลาที่เหมาะสมไปวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายโบรไมด์ ที่ผ่านคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ จนค่าความเข้มข้นออกของสารละลายโบรไมด์มีค่าเท่ากับ 10 มก./ลิตร จึงเปลี่ยนเป็นป้อนน้ำ DI ด้วยอัตราการไหล 10 มล./ชม. แล้วนำตัวอย่าง

ที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารละลายโบรไมด์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Dionex; LC 25; Column AS-114 mm. \times 250mm.; IP 25 ED 50A)

6. การทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดินโดยใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำที่ปนเปื้อนด้วยเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 และ 100 มก./ลิตร ผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มล./ชม. เก็บน้ำที่ทางออกไปวิเคราะห์หาค่าเบนซีนที่เวลาต่างๆ และนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเบนซีนโดยวิธีการเทคนิคเฮดสเปซด้วยเครื่องแกสโครมาโตกราฟี

7. การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว โดยใช้โปรแกรม STANMOD\CFITIM และวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ STANMOD\CXTFIT\Direct problem ซึ่งโปรแกรม CXTFIT เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประยุกต์และปรับปรุงโดย Parker และ Van Genuchten (1984) ใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งสมมติฐานของโปรแกรม คือ

1. ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบสมดุล (equili-

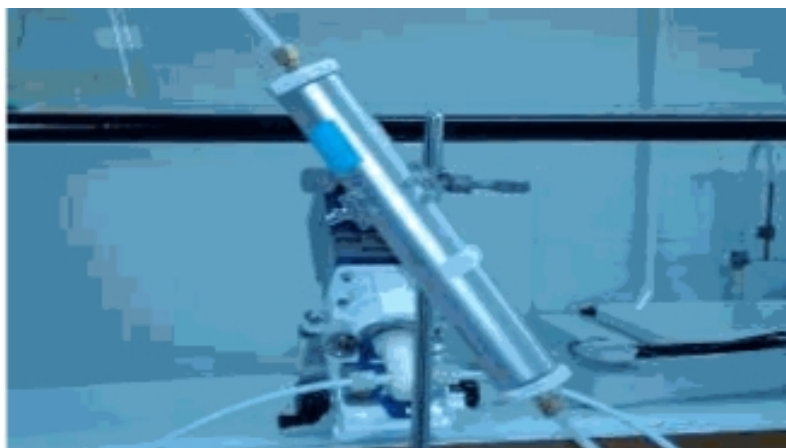


Figure 1. Column test model

brium transport)

2. ดินตัวกลางมีคุณสมบัติเหมือนกันและมีเนื้อเดียวกัน
3. พิจารณาเฉพาะการไหลผ่านตัวกลางอิมตัว
4. การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state flow) และเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ
5. สมการที่ใช้ในการเคลื่อนที่เป็นแบบการพาและแพร่กระจายในหนึ่งมิติ (Convection-Dispersion Equation; CDE) ดังนี้

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

- โดยที่ C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (mg/l)
v = ความเร็วน้ำใต้ดินผ่านตัวกลาง (L/t)
D = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (L²/t)
X = ทิศทางของการไหล
 μ = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (first order rate constant)
 γ = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ (zero order rate constant)
R = ค่าคงที่ของการหน่วง (retardation factor)

และ
$$R = 1 + (\rho / n) K_d$$

- โดยที่ ρ = ความหนาแน่นแห้งของดิน (kg/m³)
n = ความพรุนของดิน
 K_d = ค่าคงที่ของการดูดซับ

ผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน พบว่าค่าความชื้น (moisture content) มีค่า 0.8% ปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอน (organic carbon) มีค่า 0.2% ความหนาแน่น (bulk density) มีค่า 2.6 กรัม/ลบ.ซม. ค่าความพรุน (porosity) มีค่า 0.32 และค่าพีเอช (pH) เป็น 7.4

2. ผลการศึกษาการทดสอบหาค่าไอโซเทอมของการดูดซับ

จากการทดลองพิจารณาความสามารถในการดูดซับของเบนซีนโดยปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอนบนผิวดินตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร มีความสามารถในการดูดซับของเบนซีนเป็น 7.35 10.93 26.37 และ 44.81 ไมโครกรัม เบนซีน/กรัมของดินตัวอย่างตามลำดับ โดยไอโซเทอมของการดูดซับของเบนซีนเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Isotherm) ดัง Figure 2 ซึ่งโดยทั่วไปการดูดซับของสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจะเป็นแบบเชิงขั้ว (Schirmer *et al.*, 1999) สำหรับค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เป็น 0.5444 ลบ.ซม./กรัม โดยค่าการหน่วงการเคลื่อนตัว (retardation factor) มีค่าเป็น 5.423 ซึ่งเป็นค่าสูงถือว่าการดูดซับของเบนซีนบนผิวดินมีนัยสำคัญสำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์ ค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) ค่อนข้างแปรปรวน โดยขึ้นกับค่าปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอนของตัวดูดซับ (% organic carbon, OC) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K_{oc}) (Schirmer *et al.*, 1999) ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสารอินทรีย์แขวนลอย พื้นที่ผิวของตัวกลางที่ต่างกันส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ของค่าปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอนของตัวดูดซับ (% organic carbon, OC) กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K_{oc}) มีค่าแตกต่างกัน (Renu, 2002)

3. ผลการศึกษาการทดสอบความสามารถในการปรับสภาพและอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

จากการทดลองหาค่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร ในวันที่ 3 10 10 และ 25 ของการทดลองตามลำดับ ซึ่งเป็นวันที่จุลินทรีย์เริ่มนำเบนซีนไปใช้เป็นอาหารได้อย่างชัดเจน โดยค่าความเข้มข้นของเบนซีนที่ลดลง สามารถหาค่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของเบนซีนเป็น 0.0092 0.0054 0.0035 และ 0.0009 ต่อวัน ของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร ตามลำดับ ดัง Figure 3 ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากใช้จุลินทรีย์ในดินบางตัวสามารถใช้เบนซีนเป็นแหล่งคาร์บอนได้ แต่เมื่อความเข้มข้นของเบนซีนเพิ่มขึ้น

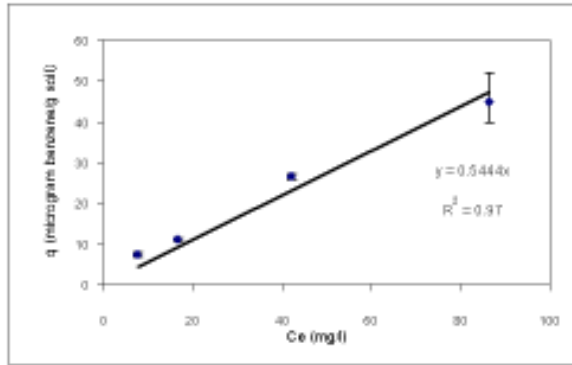


Figure 2. Linear Isotherm of benzene in soil sample.

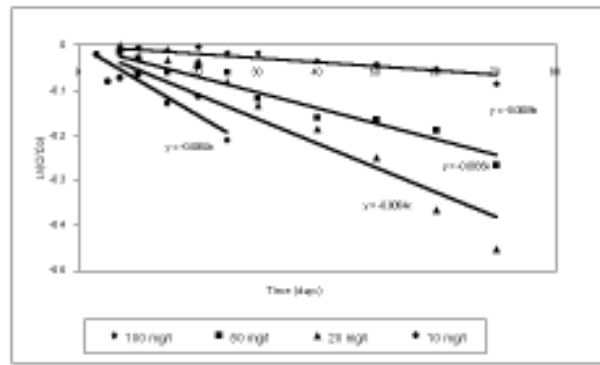


Figure 3. Biodegradation rate of benzene at 10, 20, 50 and 100 mg/l.

อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพลดลง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากที่ความเข้มข้นสูงก่อให้เกิดสภาวะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ รวมถึงปริมาณของจุลินทรีย์ที่จำกัดในระบบของการทดลอง (Misra, 1993; Nielson and Christensen, 1994)

4. ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาตรของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นสารละลายโบรไมด์ขาเข้า ($C/C_0 = 1$) มีปริมาตรเท่ากับ 4.5 pore volume ซึ่งเท่ากับ

ป้อนสารละลายโบรไมด์ให้ไหลผ่านคอลัมน์เป็นปริมาตร 146.89 มล. โดยใช้เวลาไป 14.5 ชั่วโมง นำผลการทดลองที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (dispersion coefficient) ของดิน จากโปรแกรม STANDMOD\CFITIM พบว่ามีค่า 8.84×10^{-3} และ 11.66×10^{-3} ตร.ซม./วินาที สำหรับคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองการเคลื่อนตัวของเบนซินที่มีกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวและที่มีกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพเข้าร่วม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบรรจุดินในคอลัมน์ค่อนข้างดี โดยลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดลองประมวลผลด้วยโปรแกรม แสดงได้ดัง Figure 4 และจากการรันโปรแกรมพบว่าค่า Peclet number ($PN = vL/D$) ซึ่งเป็นค่าบอกถึงสัดส่วนกลไกการ

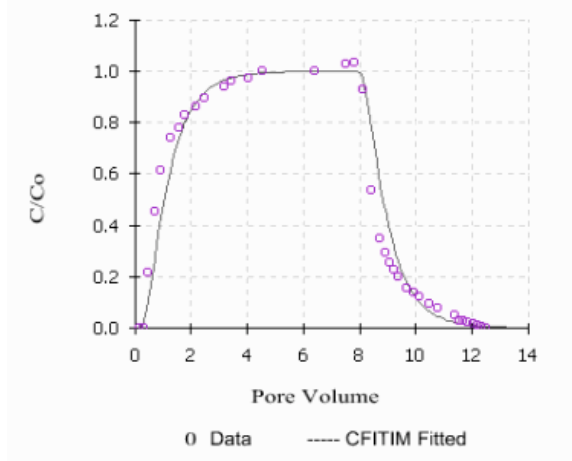


Figure 4. Transportation of Bromide solution from column test and modeling.

พาต่อการกระจายตัว บ่งบอกลักษณะการเคลื่อนตัวในดินว่าเคลื่อนตัวด้วยกลไกใด ซึ่งในที่นี้บ่งบอกว่ากลไกการพามีค่าสูงกว่ากลไกการกระจายตัวถึง 3.924 เท่า แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของสารในคอลัมน์เป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวด้วยการพามากกว่าการกระจายตัว ทั้งนี้ด้วยลักษณะของดินตัวอย่างที่มีขนาดใกล้เคียงกันคือ ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และการบรรจุดินตัวอย่างในคอลัมน์ที่ทำให้ความแตกต่างของช่องว่างมีน้อย กลไกการกระจายตัวจึงมีผลไม่เด่นชัด เช่น กลไกการพา

5. ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test)

จากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดินโดยมีกลไกที่สำคัญคือ การพา การดูดซับ การกระจายตัว และการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยในการทดลองได้มีการศึกษาผลของแต่ละกลไก พบว่าการเคลื่อนตัวและจากผลการศึกษาในทั้งสองคอลัมน์พบว่าการเคลื่อนตัวของเบนซีนเป็นแบบสมดุลย์ไม่อุดมคติ (non-ideal equilibrium transport) ซึ่งรูปร่างของการเคลื่อนตัวที่ได้ไม่สมมาตร โดยมีการดูดซับในคอลัมน์มีค่าสูงกว่าการทดลองแบบกะ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนของดินกับเบนซีนเป็น 6:1 ซึ่งสูงกว่าในการทดลองแบบกะที่มีค่าเป็น 3:1 ทำให้การดูดซับมีค่าสูงกว่าแบบกะ และลักษณะการคายตัวเป็นแบบหางยาว (long tail desorption process)

คือ การคายตัวช้าลง อันเนื่องมาจากการรบกวนการเคลื่อนตัวจากการแพร่กระจายตัวของมวลที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Khemarath, 2001) และบางส่วนของเบนซีนเคลื่อนที่โดยกลไกการแพร่กระจาย (diffusion process) เพราะมีการเคลื่อนตัวผ่านช่องว่างที่มีขนาดเล็กมากโดยสามารถดูจากความแตกต่างของผลจากจำลองการเคลื่อนตัวด้วยโปรแกรม CXTFIT กับผลจากการทดลองแบบคอลัมน์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงการดูดซับเบนซีนด้วยดินที่เกิดขึ้นในคอลัมน์นั้นเป็นกระบวนการดูดซับแบบไม่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ (non-equilibrium adsorption process) ซึ่งเมื่อนำเอาสมการแบบจำลองการเคลื่อนตัวที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าการดูดซับจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (local equilibrium assumption) มาทำการจำลองการเคลื่อนตัว จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลอง กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสภาพเหมือนจริง ซึ่งในสภาวะสมดุล (local equilibrium assumption) นี้จะเป็นไปตามแนวคิดที่ว่า เมื่ออนุภาคดินสัมผัสกับเบนซีนอนุภาคดินจะสามารถดูดซับเบนซีนได้ทันทีโดยไม่ต้องอาศัยเวลาสัมผัส จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัส โดยผลต่างของการเคลื่อนตัวของเบนซีนระหว่างการทดลองและการรันโปรแกรมด้วยกลไกต่างๆ แสดงดัง Figure 5 และ Figure 6

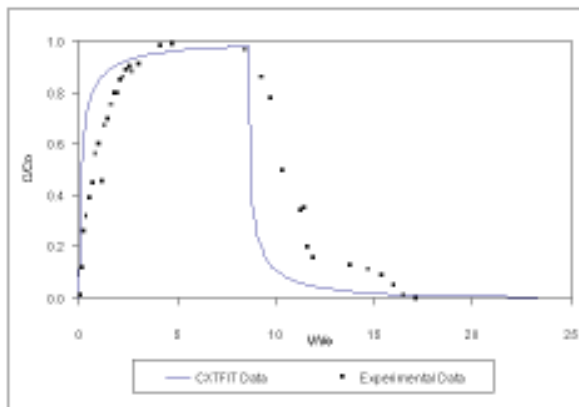


Figure 5. Transportation of benzene at 10 mg/l between batch test and modeling for abiotic processes.

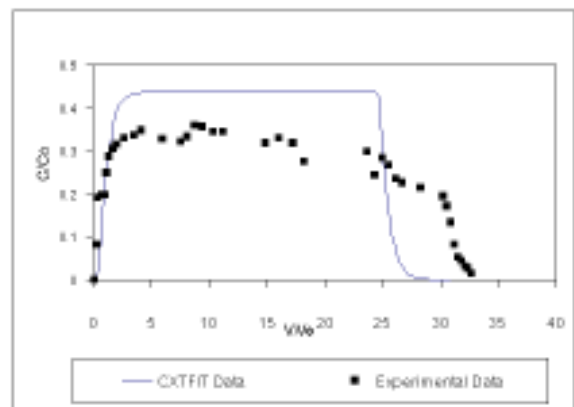


Figure 6. Transportation of benzene at 10 mg/l between batch test and modeling for biotic processes.

สรุปผลการวิจัย

1. การศึกษาการดูดซับของเบนซีนบนผิวดินพบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นไอโซเทอมแบบเชิงเส้น (linear isotherm) มีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เป็น 0.5444 ลบ.ซม./กรัม โดยค่าคงที่ของการดูดซับที่ได้นี้ นำมาคำนวณค่าการหน่วงการเคลื่อนที่ (retard factor) เป็น 5.423 ทำให้ทราบว่าความเร็วเคลื่อนที่ของเบนซีนมีค่าต่ำกว่าความเร็วเคลื่อนที่ของน้ำเป็น 5.423 เท่า

2. การศึกษาหาความสามารถในการปรับสภาพของ จุลินทรีย์ในดินและการย่อยสลายทางชีวภาพของเบนซีน พบว่าจุลินทรีย์ในดินสามารถปรับสภาพให้ย่อยสลายเบนซีน ได้ในวันที่ 3 10 10 และ 25 ของการทดลองที่ความเข้มข้นของเบนซีนเป็น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร ตามลำดับ และสามารถหาค่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นแบบ ลำดับที่หนึ่งมีค่า 0.0092 0.0054 0.0035 และ 0.0009 ต่อวัน ของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มก./ลิตร ตามลำดับ

3. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (dispersion coefficient) ของดิน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเป็น 8.84×10^{-3} และ 11.66×10^{-3} ตร.ซม./วินาที โดยค่า Peclet Number ปังบอกถึงกลไกการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการพาเป็นสำคัญ

4. การศึกษาการเคลื่อนที่ของเบนซีนโดยการทดลองแบบคอลัมน์และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ ผลการเคลื่อนที่ พบว่าการเคลื่อนที่ของเบนซีนเป็นแบบ สมดุลย์ไม่อุดมคติ (non - ideal equilibrium) ซึ่งรูปร่างของการเคลื่อนที่ที่ได้ไม่สมมาตร และเมื่อศึกษาผลของการย่อยสลายทางชีวภาพร่วมด้วยนั้น พบว่าการเคลื่อนที่ของสารจะช้าลง เข้าสู่สมดุลย์ช้าและลดค่าความเข้มข้นของเบนซีนที่ได้ และผลจากการใช้แบบจำลองทำนายการเคลื่อนที่ของเบนซีน พบว่าโปรแกรม CXTFIT ทำนายผลได้ในลักษณะมากกว่าการเคลื่อนที่จริงตามธรรมชาติ

เอกสารอ้างอิง

- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2542. เบนซีน. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.
- Misra Girish Chandra. 1993. Transport and fate of benzene in a saturated groundwater environment-Laboratory column study. Thesis. Asian Institute of Technology.
- Renu Jailuk. 2002. Development of a QSAR model to predict soil organic carbon-water partition coefficients of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Thesis. Chulalongkorn University.
- Khemarath Osathaphan. 2001. Multi-metal equilibrium sorption and transport modeling for Copper, Chromium, and Arsenic in an Iron oxide-coated sand, synthetic groundwater system. Thesis. Oregon State University.
- Franzmann, P.D., Robertson, W.J., Zappia, L.R., and Davis, G.B. 2002. The role of Microbial populations in the containment of aromatic hydrocarbons in the subsurface. Biodegradation. 13: 65- 78.
- Nielsen, P.H. and Christensen, T.H. 1994. Variability of biological degradation of aromatic hydrocarbons in an aerobic aquifer determine by laboratory batch experiments. Journal of Contaminant Hydrology. 15: 305-320
- Schirmer, M. et al. 1999. Evaluation of Biodegradation and Dispersion as Natural Attenuation Processes of MTBE and Benzene at the Borden Field Site. Physics and Chemistry of the Earth. Part B, Hydrology, Oceans and Atmosphere. 24: 557-560.
- Schwarzenbach, Rene P. and Westall John. 1981. Transport of Nonpolar Organic Compounds from Surface Water to Groundwater: Laboratory Sorption Studies. Environmental Science & Technology. 15: 1360-1367.
- Yerushalmi, L. and Guiot, S.R. 1998. Kinetics of biodegradation of gasoline and its hydrocarbon constituents. Apply Microbiology Biotechnology. 49: 475-481.