

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่าง ที่เป็นตัวแทนของดินในเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด โดยนำตัวอย่างดินร่อนผ่านตะแกรงเพื่อจำแนกประเภทของดินตัวอย่าง พบว่าเป็นดินประเภทตะกอนทราย (Silty Sand) จากการจำแนกดินตามขนาดของเม็ดดินของกรมช่างสหรัฐอเมริกา (มณฑิเยร, 2533) ซึ่งได้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับการศึกษาผลดินในเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ที่พบว่าดินบริเวณดังกล่าวเป็นดินประเภท SM และ SM-SC (นริศ, 2536) สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ที่ทำการศึกษา แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

คุณสมบัติของดิน	ผลที่ได้จากการทดสอบ
1. ค่าความชื้น (Moisture Content)	0.8 %
2. ปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอน (Organic Carbon Content)	0.2 %
3. ความหนาแน่น (Bulk Density)	2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
4. ค่าความพรุน (Porosity)	0.32
5. พีเอช (pH)	7.4
6. เบนซีน (Benzene)	0.408 ไมโครกรัมเบนซีนต่อกรัมดิน

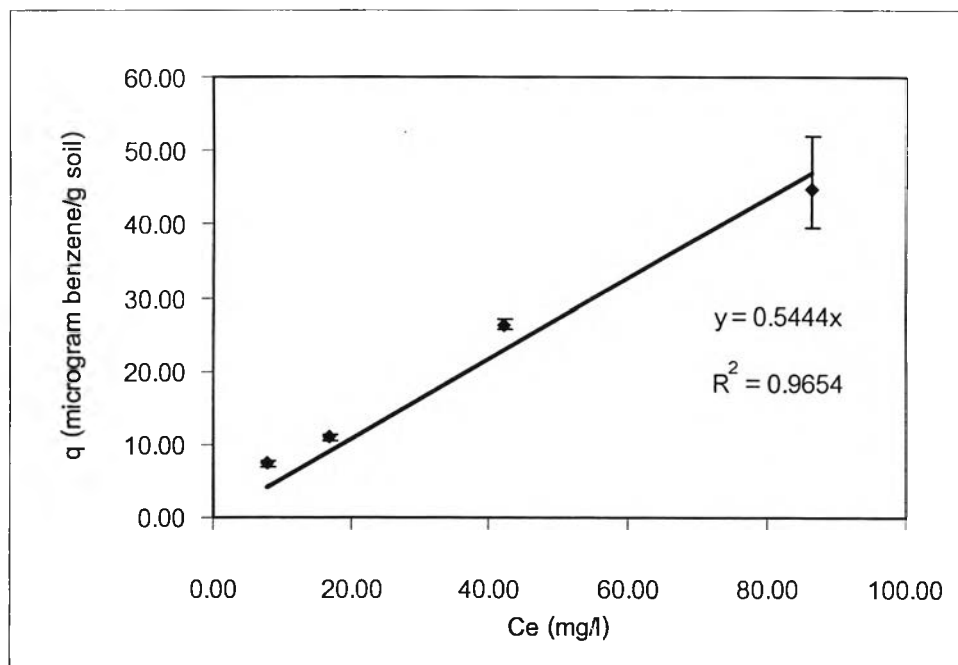
จากสภาพดินตัวอย่างเป็นดินตะกอนทราย มีค่าความชันการไหลหรือค่ายอมให้น้ำซึมผ่านได้ (Hydraulic Conductivity) เป็น 1×10^{-7} ถึง 2×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที (มณฑิเยร, 2533)

4.2 ผลการศึกษาการทดสอบหาค่าไอโซเทอมของการดูดซับ

การทดสอบเพื่อหาค่าไอโซเทอมของการดูดซับของเบนซีนบนผิวดินตัวอย่างโดยใช้น้ำได้ดินสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของเบนซีนเป็น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ต่อดินตัวอย่าง 3 กรัม โดยวัดค่าพีเอชเริ่มต้นได้ 7.4 และนำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของเบนซีนบนผิวดินตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการดูดซับของเบนซีนเป็น 7.35 10.93 26.37 และ 44.81 ไมโครกรัมเบนซีนต่อกรัมของดินตัวอย่าง ตามลำดับ โดยไอโซเทอมของการดูดซับของเบนซีนเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Isotherm) ดังรูปที่ 4.1 ทำให้สามารถหาค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) ได้จากความชันของกราฟ ซึ่งมีค่าเป็น 0.5444 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม โดยค่าคงที่ของการดูดซับที่ได้นี้ นำมาคำนวณค่าการหน่วงการเคลื่อนตัว (Retardation Factor) ตามสมการที่ (2.8) มีค่าเป็น 5.423 ซึ่งเป็นค่าสูงถือว่าการดูดซับของเบนซีนบนผิวดินมีนัยสำคัญ โดยค่าพารามิเตอร์ที่นำไปใช้ในการศึกษาวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะกล่าวถึงอีกครั้งในหัวข้อ 4.6

สำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์ ค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) ค่อนข้างแปรปรวน โดยขึ้นกับค่าปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอนของตัวดูดซับ (% oc) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K_{oc}) (Schmarzenbach และ Westall, 1981) แต่เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวถึง 5 เท่า ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง สารอินทรีย์แขวนลอย พื้นที่ผิวของตัวกลางที่ต่างกันส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ของค่าปริมาณอินทรีย์สารคาร์บอนของตัวดูดซับ (%oc) กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K_{oc}) มีค่าแตกต่างกัน (Jailuk, 2002)

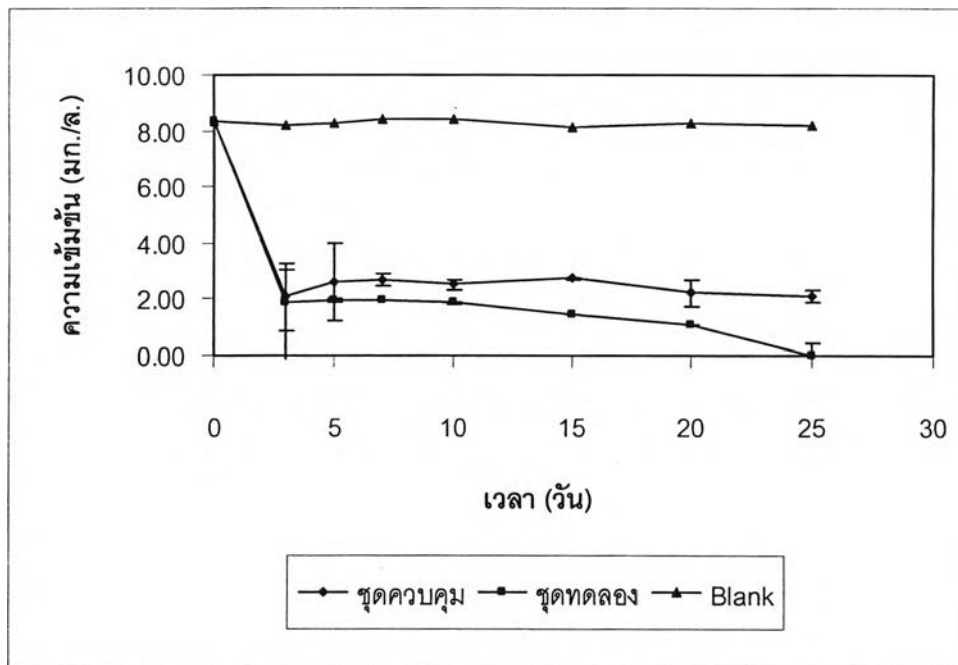


รูปที่ 4.1 ไอโซเทอมแบบเชิงเส้นเส้นของการดูดซับของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3 ผลการศึกษาการทดสอบความสามารถในการปรับสภาพและอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยา

4.3.1 ผลการศึกษาความสามารถในการปรับสภาพของจุลินทรีย์ในดิน

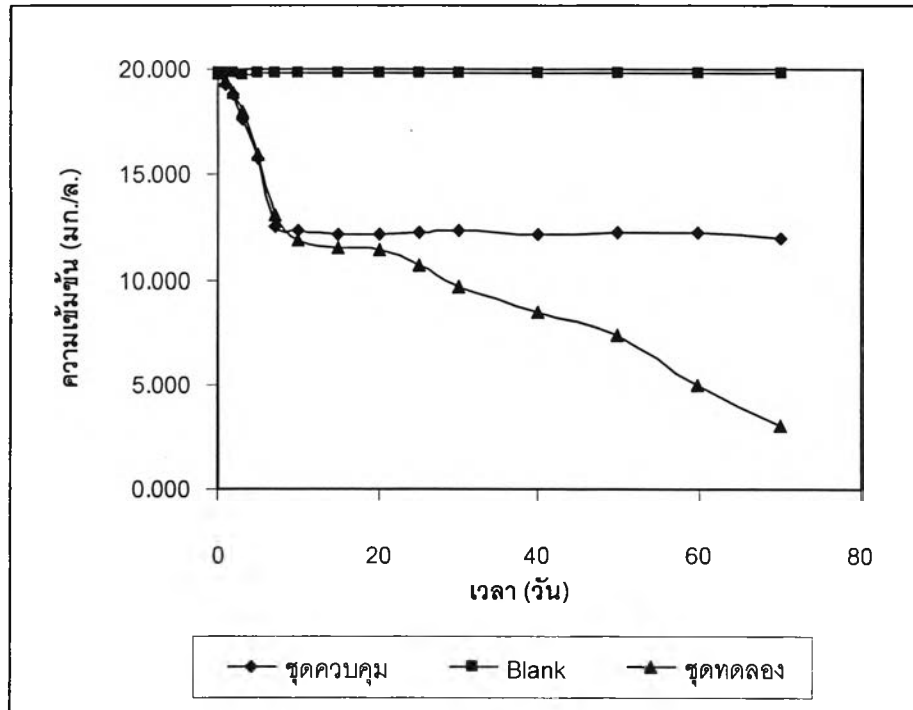
ผลการศึกษาการทดสอบความสามารถในการปรับสภาพของจุลินทรีย์ในดินต่อการคุ้นเคยกับเบนซีนพบว่า เบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีลักษณะการลดลงของความเข้มข้น ดังรูปที่ 4.2 โดยในช่วงวันที่ 1 ถึง 3 ของการทดลองความเข้มข้นของเบนซีนอันเนื่องมาจากการดูดซับบนผิวดิน และการใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในดินยังไม่สามารถแยกได้อย่างชัดเจน ซึ่งในวันที่ 5 ของการทดลองการลดลงอันเนื่องมาจากการใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในดินเกิดขึ้นอย่างชัดเจนและค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถหาค่าได้ในวันที่ 25 ของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากช่วงแรกของการทดลองจุลินทรีย์อยู่ในช่วง Lag Phase ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ในดินค่อยๆ ปรับสภาพให้คุ้นเคยกับเบนซีนและสามารถนำเบนซีนไปใช้เป็นแหล่งอาหารได้ โดยช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพมีค่าน้อยหรือถือว่าสามารถปรับตัวได้รวดเร็วเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในสภาวะที่ต้องการออกซิเจนการปรับสภาพของเบนซีนเกิดได้รวดเร็ว ไม่เกิน 9 วัน (Nielson และ Christensen, 1994)



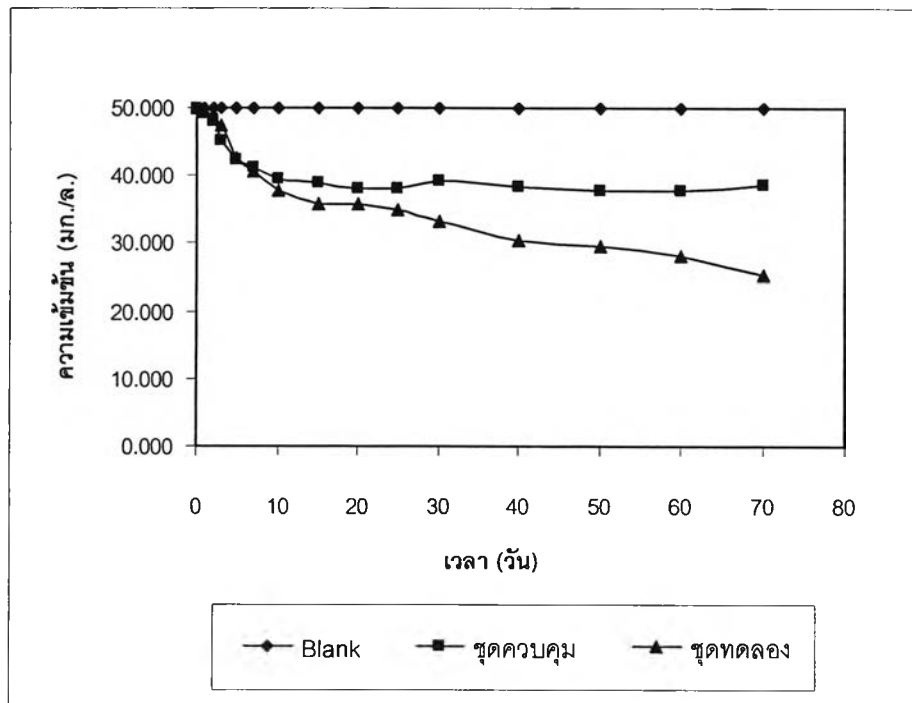
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ

เช่นเดียวกันกับที่ความเข้มข้น 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 โดยในช่วงแรกของการทดลองความเข้มข้นของเบนซีนลดลงทั้งสองชุดการทดลองโดยไม่สามารถแยกได้ชัดเจนว่าลดลงด้วยกลไกใด จนกระทั่งในวันที่ 10 ของการทดลอง ความเข้มข้นของเบนซีนในชุดทดลองลดลงและสามารถแยกจากชุดควบคุมได้อย่างชัดเจน ดังนั้นความสามารถในการปรับสภาพของจุลินทรีย์ในดินต่อความเข้มข้นของเบนซีนที่ 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดขึ้นในวันที่ 10 ของการทดลอง สำหรับที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นสูงจึงทำให้ใช้เวลานานถึง 25 วันในการปรับสภาพให้คืนเคย ดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นสูงทำให้จุลินทรีย์บางชนิดบางตัวไม่สามารถปรับสภาพให้นาเบนซีนไปใช้งานได้ เนื่องจากความเข้มข้นสูงทำให้เกิดภาวะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ ทั้งนี้สภาวะที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเบนซีนสูงเกิน 32 มิลลิกรัมต่อลิตร (Misra, 1993)

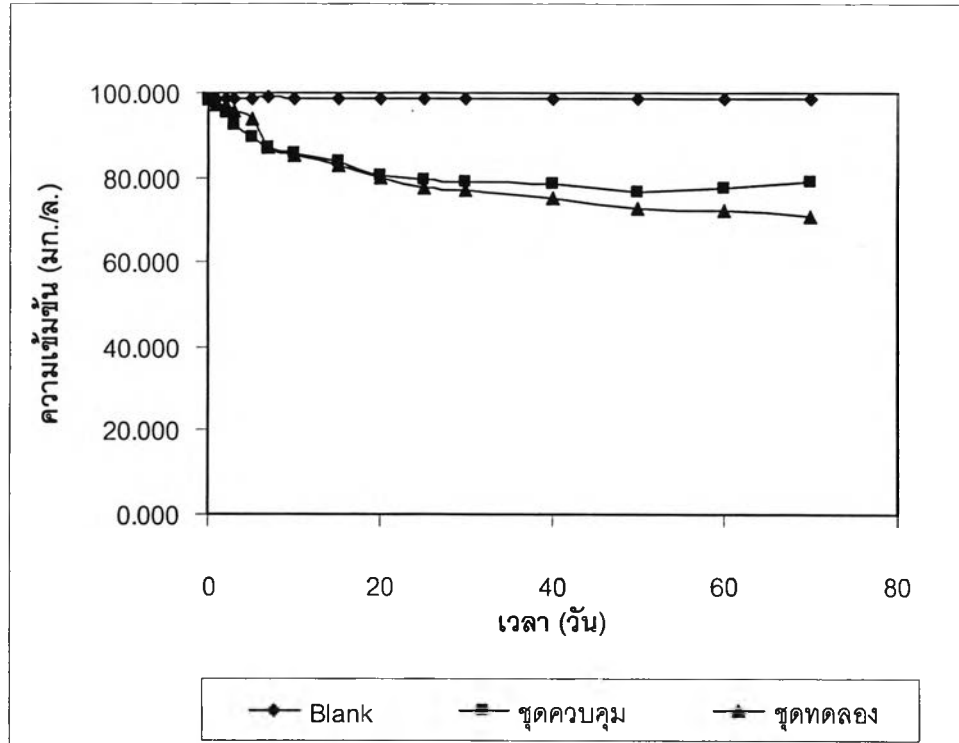




รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมของเบนซีนที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ



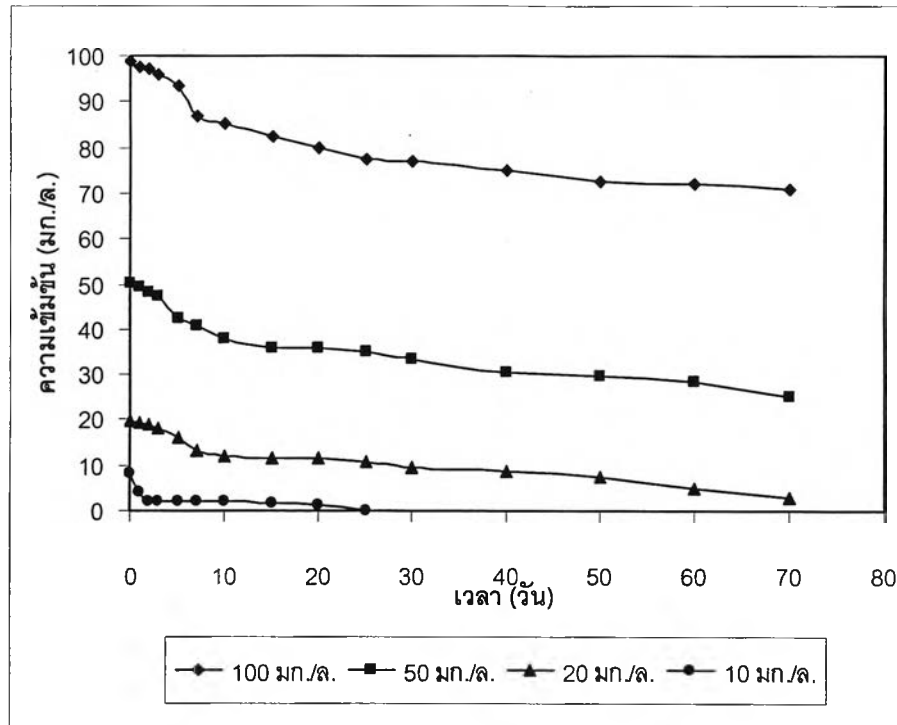
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมของเบนซีนที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ



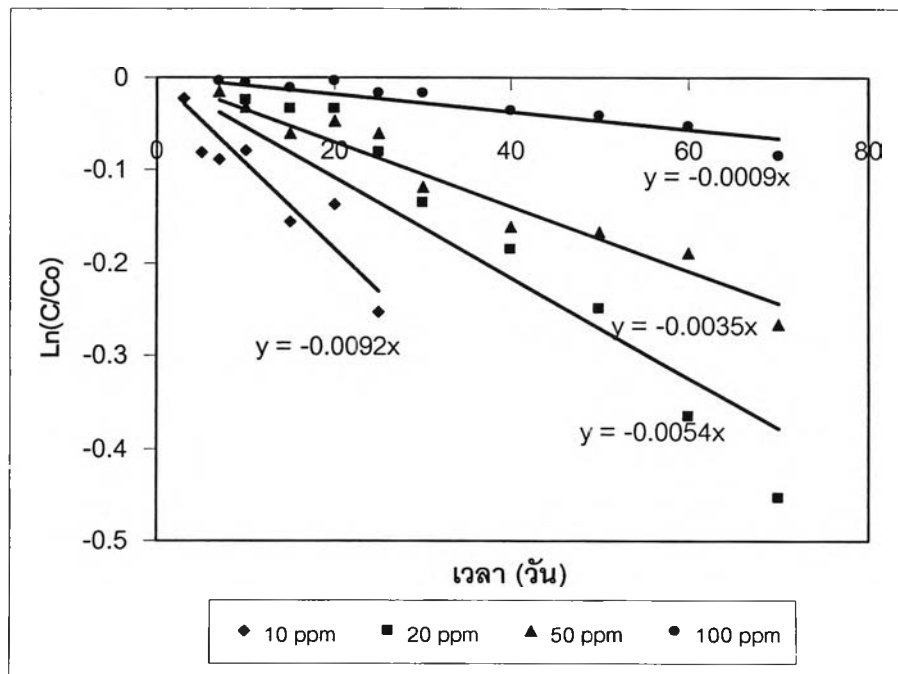
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมของเบนซินที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ

4.3.2 ผลการหาอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซินโดยจุลินทรีย์ในดิน

จากการทดลอง จะเริ่มพิจารณาค่าอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซินที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 3 10 10 และ 25 ของการทดลอง ตามลำดับ ซึ่งเป็นวันที่จุลินทรีย์เริ่มนำเบนซินไปใช้เป็นอาหารได้อย่างชัดเจน โดยค่าความเข้มข้นของเบนซินที่ลดลงอันเนื่องการย่อยสลายทางชีววิทยามีลักษณะดังรูปที่ 4.6 และสามารถหาค่าอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซินเป็น 0.0092 0.0054 0.0035 และ 0.0009 ต่อวัน ของเบนซินที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากใช้จุลินทรีย์ในดินโดยไม่ได้คัดแยกสายพันธุ์หรือนำเชื้อจากระบบบำบัดของโรงงานปิโตรเลียมเช่นงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา

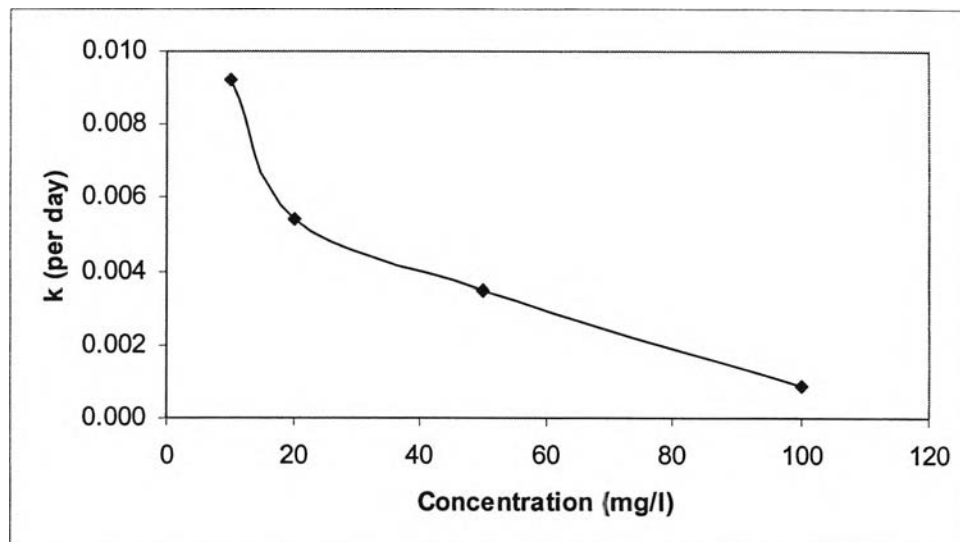


รูปที่ 4.6 การลดลงของความเข้มข้นของเบนซีนจากการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 อัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

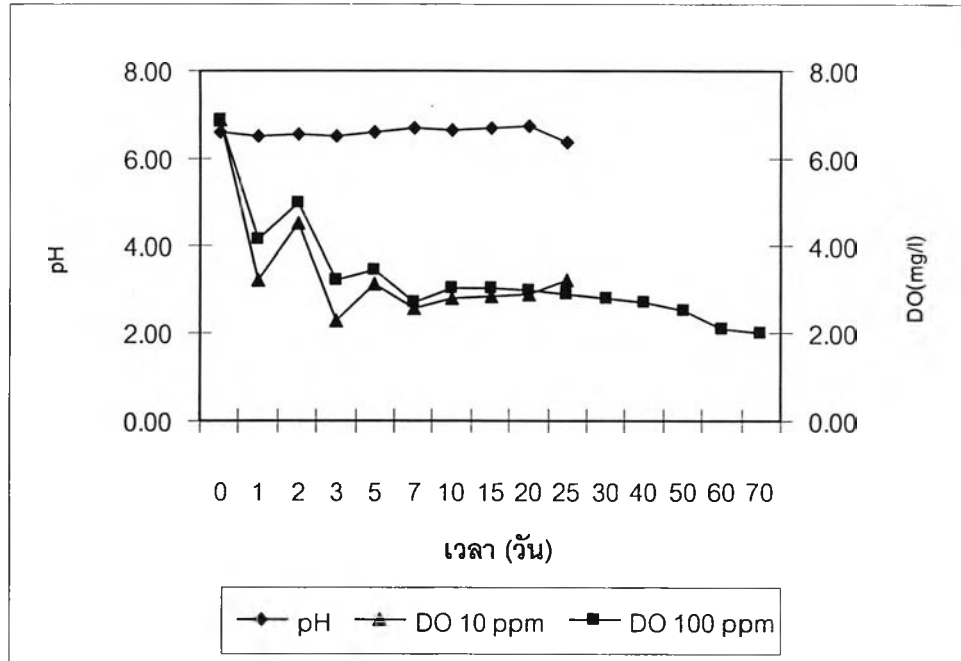
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของเบนซีนเพิ่มขึ้นอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาลดลง ดังรูปที่ 4.8 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากที่ความเข้มข้นสูงก่อให้เกิดสภาวะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ รวมถึงปริมาณของจุลินทรีย์ที่จำกัดในระบบของการทดลอง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีนกับค่าอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 20 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน ค่าออกซิเจนละลายและพีเอช

จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของเบนซีนค่อยๆ ลดลงตามเวลาและค่าออกซิเจนละลายก็ลดลงตามเวลาเช่นกัน โดยการหายไปของค่าออกซิเจนละลายเป็นจากความต้องการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในระบบที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าออกซิเจนละลายต่ำสุดที่ 3.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 25 ของการทดลอง โดยที่ความเข้มข้นสูงสุด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าออกซิเจนละลายต่ำสุดเป็น 1.98 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 70 ของการทดลองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและค่าออกซิเจนละลายที่เปลี่ยนไปตามเวลา

สำหรับค่าพีเอชในระบบมีค่าแปรปรวนขึ้นลงไม่คงที่แต่ยังอยู่ในช่วงค่าพีเอชที่จุลินทรีย์สามารถดำรงอยู่ได้ในสภาวะต้องการออกซิเจน ทั้งนี้ตามทฤษฎีความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายเบนซีนเป็นไปดังสมการ



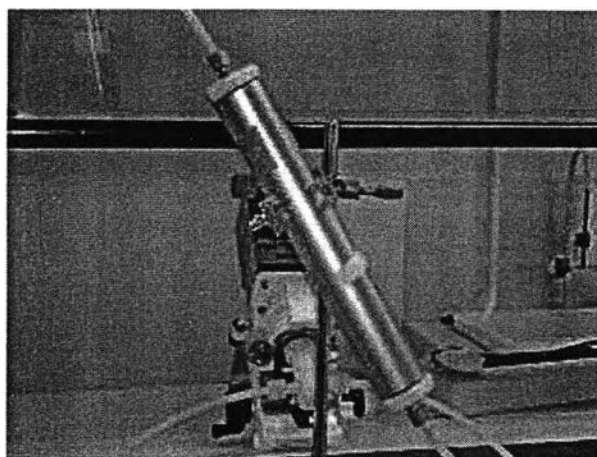
พบว่าที่เบนซีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องการ 30.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ออกซิเจนแต่ในการทดลองมีการเติมออกซิเจนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตลอดการทดลองค่าออกซิเจนละลาย ยังคงมีอยู่ในสภาวะมีออกซิเจน ทั้งนี้เพราะการหายไปของความเข้มข้นเบนซีนนั้นส่วนหนึ่งหายไปจากปฏิกิริยาการดูดซับ ดังนั้นการใช้ออกซิเจนเพื่อใช้ในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยสลายเบนซีนจึงยังคงมีอยู่

4.3.4 การเปลี่ยนรูปของเบนซีน

เนื่องจากในการทดลอง เมื่อความเข้มข้นของเบนซีนค่อย ๆ ลดลง จะมีพีค (peak) ของสารอีกชนิดเกิดขึ้น เมื่อนำค่าไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกสโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี คาดว่าสารที่ได้เป็นกลุ่มสารกรดอินทรีย์พวก Catechol หรือ Phenol ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Kelly, et al, 1997) แต่จุลินทรีย์ที่เป็นตัวหลักในการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปไม่สามารถสรุปได้ แต่โดยทั่วไป จุลินทรีย์กลุ่มใหญ่ที่มีในดิน คือ กลุ่ม *Pseudomonas* (สมศักดิ์, 2528) ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่มีผู้วิจัยพบว่าสามารถย่อยสลายเบนซีนได้ คือ *Pseudomonas putida*, *P.rhodochrous*, *P.aeruginosa*, *Nocardia* sp. (Wiedemeier, et al.,1999)

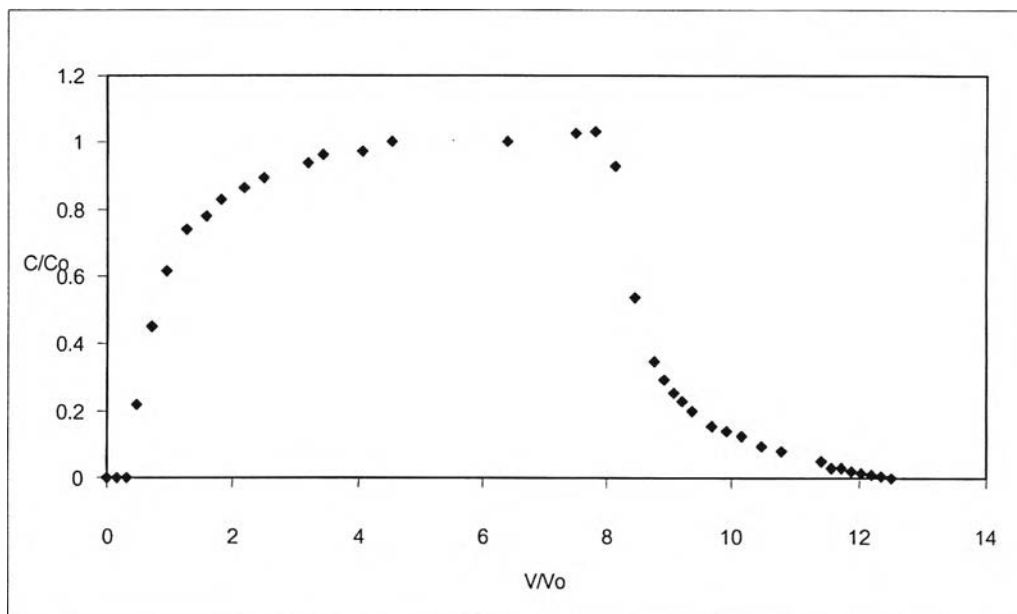
4.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน

ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์ทำด้วยเทฟลอน (Teflon) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ภายในบรรจุดินที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200 เป็นปริมาณ 180 ± 0.1 กรัม ใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำปราศจากแร่ธาตุ (DI water) ไหลผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วจึงเปลี่ยนให้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำสารละลายโบรไมด์ ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเช่นกัน ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายโบรไมด์ที่ทางออกตามเวลาต่างๆ จนกระทั่งความเข้มข้นสารละลายโบรไมด์มีค่าเท่ากับความเข้มข้นก่อนผ่านคอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ขาออกต่อขาเข้าเท่ากับ 1) โดยชุดลักษณะคอลัมน์ที่ทำการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.10

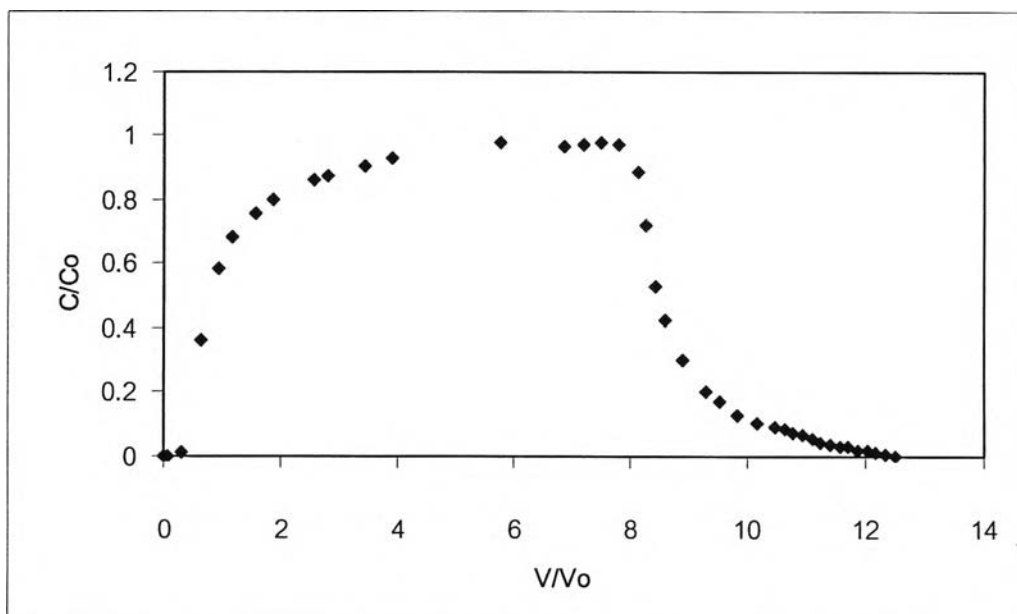


รูปที่ 4.10 ลักษณะคอลัมน์ที่ทำการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาตรของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่ 1 จนความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นสารละลายโบรไมด์ขาเข้า ($C/C_0=1$) มีปริมาตรเท่ากับ 4.5 pore volume ซึ่งเท่ากับป้อนสารละลายโบรไมด์ให้ไหลผ่านคอลัมน์เป็นปริมาตร 146.89 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาไป 14.5 ชั่วโมง และในการทดลองให้สารละลายโบรไมด์ไหลผ่านคอลัมน์ที่ 2 พบว่า ปริมาตรของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่ 2 จนความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นสารละลายโบรไมด์ขาเข้า ($C/C_0=1$) มีปริมาตรเท่ากับ 7.5 pore volume ซึ่งเท่ากับป้อนสารละลายโบรไมด์ให้ไหลผ่านคอลัมน์เป็นปริมาตร 243.12 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาไป 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถเขียนสัมพันธ์ของค่า C/C_0 กับ V/V_0 ได้ดังรูปที่ 4.11–4.12

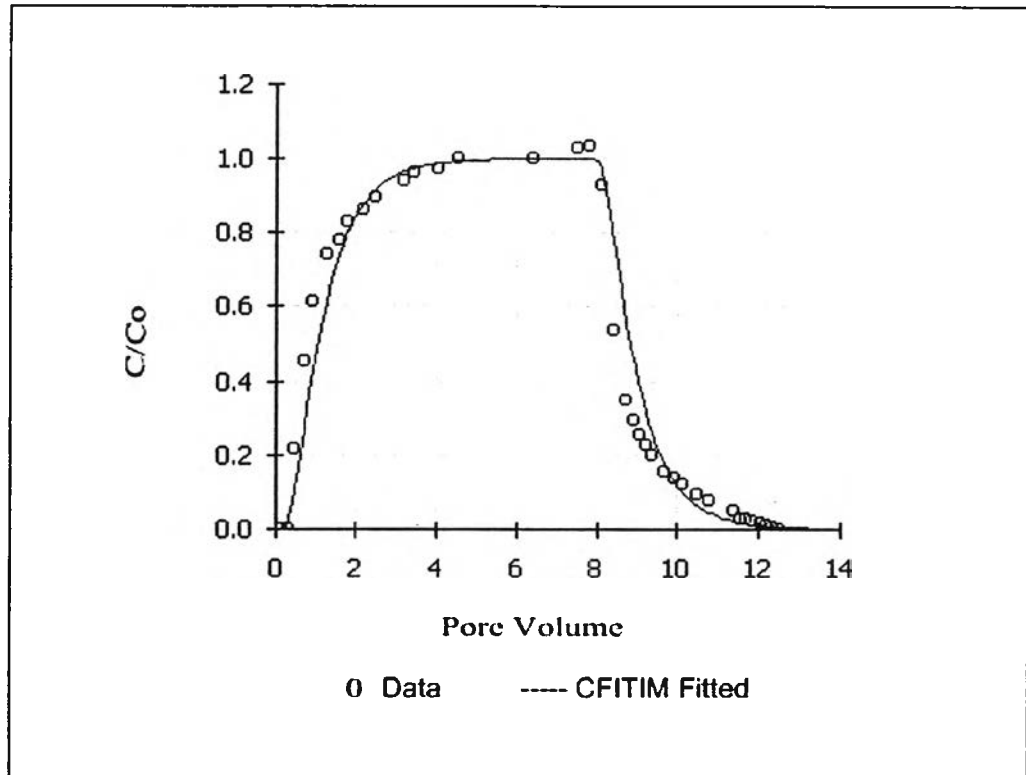


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 กับ V/V_0 ของสารละลายโพรไมด์ที่ผ่านคอลัมน์ที่ 1



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 กับ V/V_0 ของสารละลายโพรไมด์ที่ผ่านคอลัมน์ที่ 2

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน จากโปรแกรม STANDMOD\FITIM พบว่ามีค่า 8.84×10^{-3} และ 11.66×10^{-3} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ในคอลัมน์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การบรรจุดินในคอลัมน์ค่อนข้างดี โดยลักษณะของกราฟที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายโบรไมด์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFITIM โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของ Peclet number เป็น 50 และสามารถหาค่าสุดท้ายจากการรันโปรแกรมได้เป็น 3.924 (ดังรายละเอียดในตารางที่ ง.2) ซึ่งค่า Peclet number จะเป็นค่าสัดส่วนของกลไกการพาต่อการกระจายตัว บ่งบอกลักษณะการเคลื่อนตัวในดินว่าเคลื่อนตัวด้วยกลไกใด ซึ่งในที่นี้บ่งบอกว่า กลไกการพามีค่าสูงกว่ากลไกการกระจายตัวถึง 3.924 เท่า แสดงให้เห็นว่า ในการเคลื่อนตัวของสารในคอลัมน์เป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวด้วยการพามากกว่าการกระจายตัว

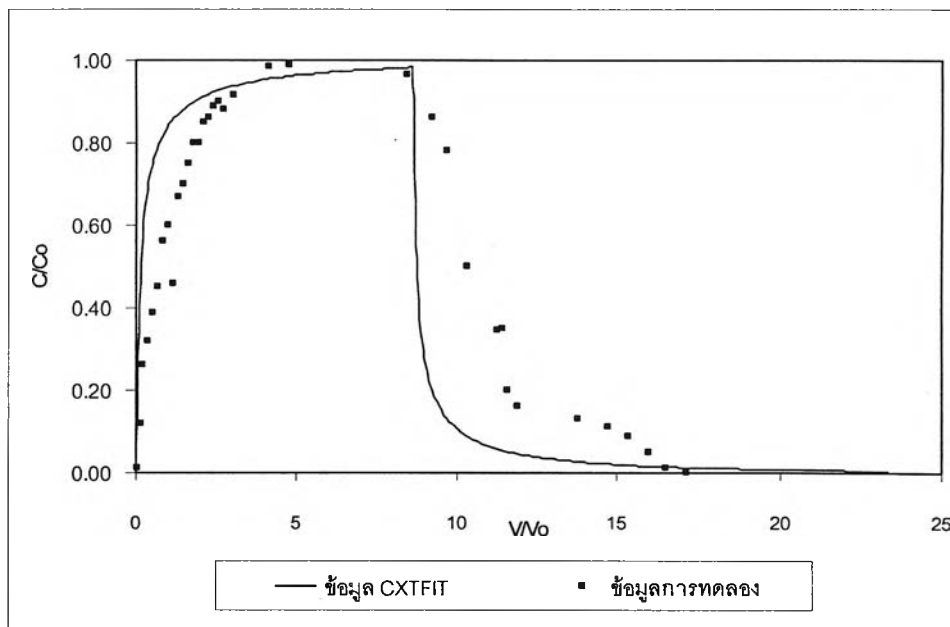
4.5 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test)

เป็นการทดลองที่ใช้คอลัมน์ที่ผ่านการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว โดยใช้คอลัมน์ที่ 1 ศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ไม่มีปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ความเข้มข้น 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งดินที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่างดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรคเพื่อยืนยันถึงการลดลงของเบนซีนอันเนื่องมาจากกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียว และคอลัมน์ที่ 2 ใช้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่มีปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีววิทยาที่เกี่ยวข้อง ที่ความเข้มข้น 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการเลือกจะศึกษาการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้นที่ 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเพราะจากการทดลองแบบกะพบว่า มีค่าอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาต่างกันมาก รวมถึงมีค่าความต่างของความเข้มข้นที่ค่าต่ำสุดและสูงสุดของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่ควรพิจารณาอย่างยิ่ง

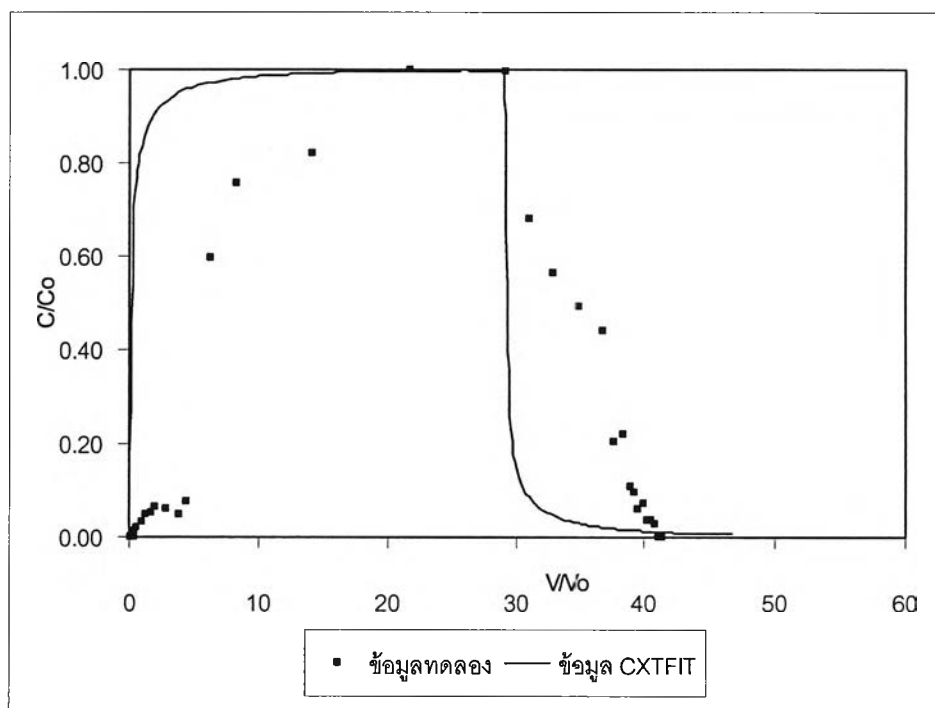
4.5.1 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column) โดยมีกลไกการดูดซับเข้าร่วม

ในการทดลองกระทำเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดิน คือ ใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำปราศจากแร่ธาตุ (DI water) ไหลผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วจึงเปลี่ยนให้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่มีเบนซีนความเข้มข้น 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรผสมอยู่ ไหลผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเช่นกัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ทางออกตามเวลาต่างๆ จนกระทั่งความเข้มข้นน้ำใต้ดินสังเคราะห์มีค่าเท่ากับความเข้มข้นก่อนผ่านคอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ขาออกต่อขาเข้าเท่ากับ 1) โดยผลการทดลองที่ได้และจากการจำลองการเคลื่อนตัวด้วยโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 4.14-4.15

จากผลการศึกษาในทั้งสองคอลัมน์พบว่าการเคลื่อนตัวของเบนซีนเป็นแบบสมดุลไม่อุดมคติ (non - ideal equilibrium transport) ซึ่งรูปร่างของการเคลื่อนตัวที่ได้ไม่สมมาตร โดยมีการดูดซับในคอลัมน์มีค่าสูงกว่าการทดลองแบบกะ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนของดินกับเบนซีนเป็น 6:1 ซึ่งสูงกว่าในการทดลองแบบกะที่มีค่าเป็น 3:1 ทำให้การดูดซับมีค่าสูงกว่าแบบกะ และลักษณะการคายตัวเป็นแบบหางยาว (long tail desorption process) คือ การคายตัวช้าลง อันเนื่องมาจากการรบกวนการเคลื่อนตัวจากการแพร่กระจายตัวของมวลที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Osathaphan, 2001)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลจากจำลองการเคลื่อนตัวด้วยโปรแกรมCXTFIT กับผลจากการทดลองแบบคอลัมน์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงการดูดซับเบนซีนด้วยดินที่เกิดขึ้นในคอลัมน์นั้นเป็นกระบวนการดูดซับแบบไม่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ (Non-equilibrium adsorption process) ซึ่งเมื่อนำเอาสมการแบบจำลองการเคลื่อนตัวที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าการดูดซับจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (Local Equilibrium Assumption) มาทำการจำลองการเคลื่อนตัว จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลอง กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสภาพเหมือนจริง ซึ่ง Local Equilibrium Assumption นี้จะเป็นไปตามแนวคิดที่ว่า เมื่ออนุภาคดินสัมผัสกับเบนซีน อนุภาคดินจะสามารถดูดซับเบนซีนได้ทันทีโดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยเวลาสัมผัส จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัส

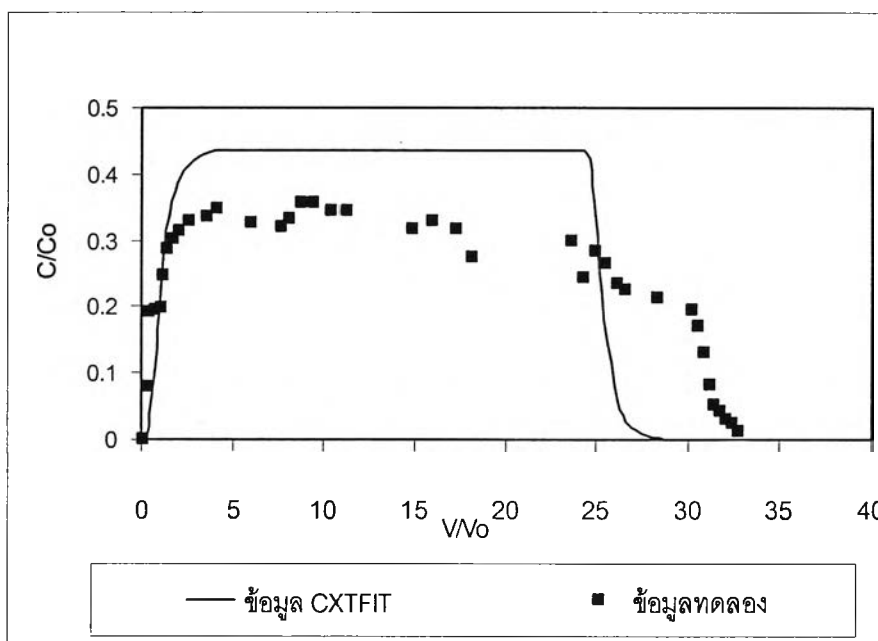
สำหรับกระบวนการการดูดซับแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) นั้นพบว่ามีสองแนวคิดที่สามารถอธิบายการดูดซับแบบไม่สมดุลนี้ได้ คือ

แนวคิดแรก การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Chemical Non-equilibrium sorption ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองของ Two-site sorption กล่าวคือ ในการดูดซับจะมีพื้นที่ของการดูดซับอยู่ 2 แบบ พื้นที่ในการดูดซับแบบแรกจะเกิดการดูดซับแบบสมดุลตาม Local Equilibrium Assumption คือดูดซับได้ทันทีเมื่อดินพบกับเบนซีนโดยไม่ขึ้นกับเวลาสัมผัส ส่วนพื้นที่ในการดูดซับแบบที่สองจะไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption คือไม่สามารถดูดซับได้ทันที แต่ต้องอาศัยเวลาสัมผัสชั่วระยะเวลาหนึ่ง จึงจะสามารถเข้าสู่สมดุลของการดูดซับได้ ดังนั้นหากเกิดกระบวนการ Two-site sorption ขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส

แนวคิดที่สอง การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Physical Non-equilibrium sorption กล่าวคือ เมื่อพิจารณาถึงขนาดของรูพรุน (Pore size) ของอนุภาคดิน ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันอาจจะกว้างใหญ่พอที่เบนซีนจะเดินทางเข้าไปสู่พื้นที่ดูดซับได้อย่างรวดเร็ว หรืออาจจะมีขนาดเล็ก แคบ และเป็นทางยาวยากต่อการเคลื่อนตัวเข้าไปสู่พื้นที่ดูดซับ จนบางครั้งการเคลื่อนตัวแบบการกระจายตัว (Dispersion) ของเบนซีน จึงอาจกลายเป็นการเคลื่อนตัวแบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งการเคลื่อนตัวแบบ Diffusion นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน (Pore size) และเวลาสัมผัส เพราะต้องใช้เวลาสัมผัสช่วงหนึ่งในการที่เบนซีนจะเดินทางเข้าสู่รูพรุนเพื่อไปสู่พื้นที่การดูดซับ ดังนั้นหากการเคลื่อนตัวของเบนซีนเข้าสู่ดินส่วนใหญ่เป็นแบบ Diffusion แล้ว ความสามารถในการดูดซับก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส ซึ่งไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption

4.5.2 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column โดยมิกลไกการย่อยสลายทางชีววิทยา เข้าร่วม)

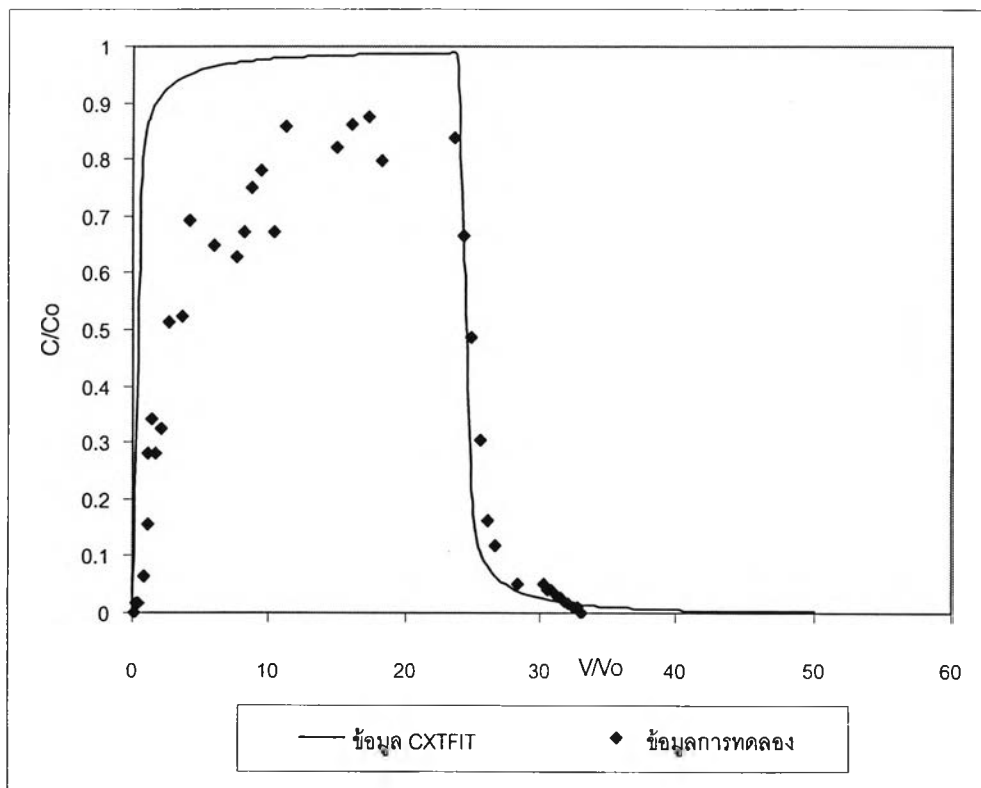
ในการทดลองกระทำเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดิน คือ ใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำปราศจากแร่ธาตุ (DI water) ไหลผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วจึงเปลี่ยนให้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำได้ดินสังเคราะห์ที่มีเบนซีนความเข้มข้น 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรผสมอยู่ ไหลผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเช่นกัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำได้ดินสังเคราะห์ที่ทางออกตามเวลาต่างๆ จนกระทั่งความเข้มข้นน้ำได้ดินสังเคราะห์มีค่าเท่ากับความเข้มข้นก่อนผ่านคอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของน้ำได้ดินสังเคราะห์ขาออกต่อขาเข้าเท่ากับ 1) โดยผลการทดลองที่ได้และจากการจำลองการเคลื่อนตัวด้วยโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 4.16-4.17



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมิกลไกการย่อยสลายทางชีววิทยาเข้าร่วมด้วย ที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีการย่อยสลายของเบนซีนด้วยอัตรา 0.0092 ต่อวัน ลักษณะการเคลื่อนตัวค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นจนถึงเริ่มคงที่ ซึ่งถือว่าเบรคทวร์จ (Breakthrough) ที่ค่าความเข้มข้นของเบนซีนขาออกต่อความเข้มข้นเบนซีนขาเข้า (C/C_o) เป็น 0.35

โดยในคอลัมน์ที่ศึกษาการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีการย่อยสลายของเบนซีนด้วยอัตรา 0.0009 ต่อวัน ลักษณะการเคลื่อนตัวค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นจนถึงเริ่มคงที่ ซึ่งถือว่าเป็นการทะลุ (Breakthrough) ที่ค่าความเข้มข้นของเบนซีนขาออกต่อความเข้มข้นเบนซีนขาเข้า (C/C_0) เป็น 0.85 ดังรูปที่ 4.17

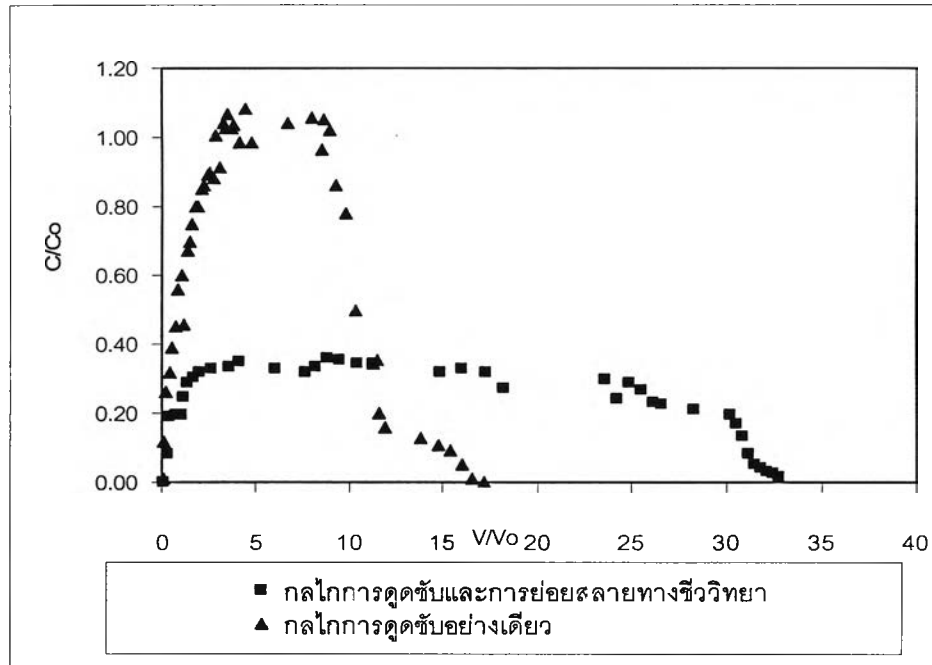


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีการย่อยสลายทางชีววิทยาร่วมด้วย ที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

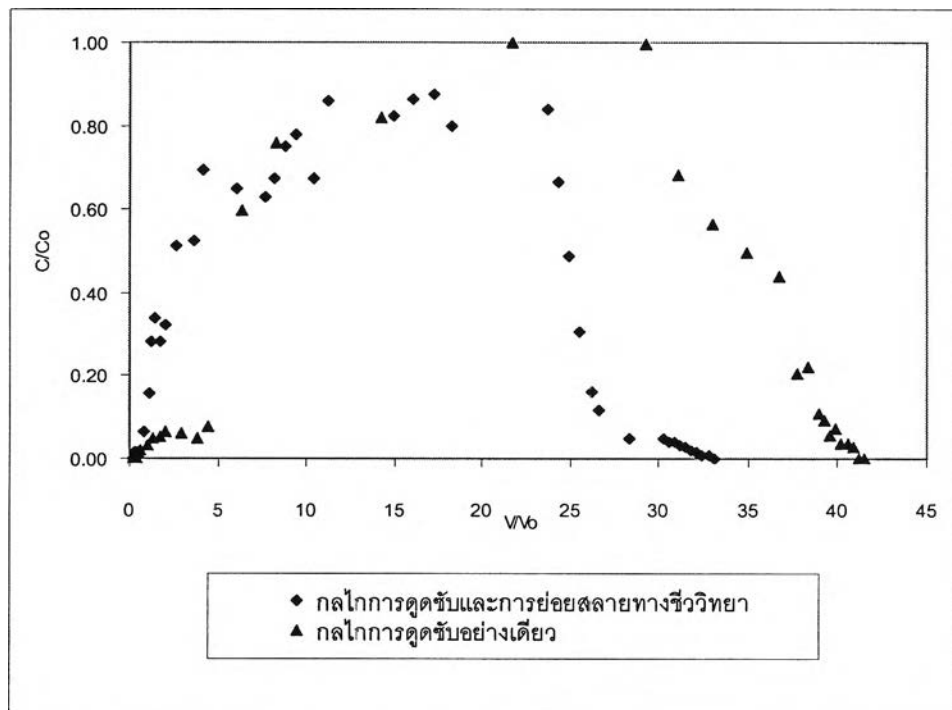
จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่า ลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่มีการย่อยสลายทางชีววิทยาเข้าร่วมมีลักษณะเช่นเดียวกับการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่มีการดูดซับเพียงอย่างเดียว คือ มีลักษณะไม่สมมาตรและมีหางยาวแต่ลักษณะสำคัญที่ได้จากการทดลองนี้ คือ การเข้าสู่สมดุล โดยค่าความเข้มข้นออกต่อค่าความเข้มข้นเข้า (C/C_0) มีค่าไม่เท่ากับ 1 แต่ค่าที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าโดยขึ้นอยู่กับค่าอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซีนในแต่ละความเข้มข้นดังจะเห็นได้จากที่ความเข้มข้นเบนซีน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเข้มข้นออกต่อค่าความเข้มข้นเข้า (C/C_0) เป็น 0.35 และ 0.85 สำหรับเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนตัวของช้าลงและความเข้มข้นจะลดลงเนื่องจากบางส่วนได้ถูกย่อยสลายไปแล้ว

4.5.3 การเปรียบเทียบผลของการเคลื่อนตัวจากกลไกการดูดซับและผลของการเคลื่อนตัวจากกลไกการดูดซับและการย่อยสลายทางชีววิทยา

ผลจากทดลองที่ได้จากการทดลองคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีกลไกการดูดซับอย่างเดียวและกลไกการดูดซับรวมกับการย่อยสลายทางชีววิทยา ดังรูปที่ 4.18 พบว่า การเคลื่อนตัวของเบนซีนในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวจะเบรคทروجได้อย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกันกับในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับรวมกับการย่อยสลายทางชีววิทยา แต่ความแตกต่างที่พบ คือ ค่าความเข้มข้นออกต่อความเข้มข้นเข้า (C/C_0) ในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 1 และในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับรวมกับการย่อยสลายทางชีววิทยามีค่าเท่ากับ 0.35 โดยค่าที่ได้นั้นแตกต่างกันมาก เช่นเดียวกับเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.19 ที่แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของเบนซีนในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวจะเบรคทروجได้รวดเร็ว เช่นเดียวกันกับในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับรวมกับการย่อยสลายทางชีววิทยา แต่ค่าความเข้มข้นออกต่อความเข้มข้นเข้า (C/C_0) ในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 1 และในคอลัมน์ที่มีกลไกการดูดซับรวมกับการย่อยสลายทางชีววิทยามีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งความแตกต่างของค่าความเข้มข้นออกต่อความเข้มข้นเข้า (C/C_0) จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากเช่นในกรณีของที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เป็นเพราะค่าอัตราการย่อยสลายทางชีววิทยามีค่าสูงกว่าที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการย่อยสลายมีส่วนสำคัญในการลดความเข้มข้นและการเคลื่อนที่ของเบนซีน โดยที่อัตราการย่อยสลายมีค่าสูงจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของเบนซีนได้ดีกว่าที่อัตราการย่อยสลายต่ำหรือไม่มีกลไกการย่อยสลายเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ช่วยลดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมในวงกว้างได้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระหว่างกลไกการดูดซับอย่างเดียวกับกลไกการดูดซับและการย่อยสลายทางชีววิทยา



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระหว่างกลไกการดูดซับอย่างเดียวกับกลไกการดูดซับและการย่อยสลายทางชีววิทยา