

บทที่ 4

ผลการศึกษาจากแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์

รายละเอียดผลการศึกษาที่จะกล่าวถึงในบทนี้แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ 1. ผลการศึกษาจากแบบจำลองกายภาพ และ 2. ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาจากแบบจำลองกายภาพ

ผลการศึกษาจากการทดลองโดยใช้แบบจำลองกายภาพแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. ผลการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสารเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมพัลส์ด้วยน้ำ และ 2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนโดยใช้เครื่องยูวี-วิซิเบิลและเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี 3. ผลการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอธิลีนและสารเบนซีนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมพัลส์ด้วยน้ำ ดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสารเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมพัลส์ด้วยน้ำ

รูปที่ 4-1 ถึง 4-6 แสดงผลการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมพัลส์ด้วยน้ำในดินชนิดที่ 1-3 ในรูปของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อน (Breakthrough Curves (BTCs)) ซึ่งแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ (แกน Y) กับเวลาที่ดำเนินการทดลอง (แกน X) และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ (C/C_0) ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อน (Normalized Breakthrough Curves (Normalized BTCs)) ซึ่งแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ต่อความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้น (แกน Y) กับเวลาที่ดำเนินการทดลอง (แกน X) การแสดงผลการศึกษาในรูปเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อน นั้นมีข้อดีคือสามารถนำผลการทดลองที่ได้จากคอลัมน์ต่างๆไปใช้เปรียบเทียบกันได้โดยตรงแม้ว่าปริมาณคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในแต่ละการทดลองจะแตกต่างกันออกไป

ผลการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ตรวจวิเคราะห์ได้ในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ต่างๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงสุด 1,362 มิลลิกรัมต่อลิตร (C_0) แล้วจึงค่อยๆลดความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงเป็นศูนย์ในที่สุด ส่งผลให้ลักษณะของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของคลอไรด์ไอออนมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำแบบไม่สมมาตรโดย มีลักษณะเบ้ไปด้านซ้ายมือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเทอร์เซอร์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง (C_0) แสดงดังตารางที่ 4-1

เมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินชนิดต่างๆที่ได้จำแนกประเภทเป็นดินชนิดที่ 1-3 ดังกล่าวในบทที่ 3 นั้นพบว่า ลักษณะเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำไม่สมมาตร จากเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์สามารถคำนวณเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุน (Mean Residence Time) ได้ ตัวอย่างการคำนวณค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนแสดงในภาคผนวก ข ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนในดินทดลองชุดที่ 1-3 สรุปไว้ในตารางที่ 4-3 ข้อแตกต่างสำคัญที่สังเกตได้คือเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนในดินทดลองชนิดที่ 1-3 ภายใต้สภาวะการไหลคงที่นั้นมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นจากการทดลองโดยใช้แบบจำลองกายภาพสามารถสรุปได้ว่าดินทดลองชนิดต่างๆที่ดำเนินการทดสอบมีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนซึ่งเป็นสารเทอร์เซอร์ที่เฉลี่ยต่อปฏิกิริยาแต่ไม่มีผลต่อรูปของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์

นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนในดินทดลองชุดที่ 1-3 ด้วย ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4-1 ถึง 4-6 พบว่า สำหรับดินทดลองชนิดเดียวกันเมื่ออัตราการไหลของน้ำในระบบทดลองปรับสูงขึ้น (60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) ส่งผลให้มีการตรวจพบคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างน้ำออกจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น ดังสังเกตได้จากเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้า (BTCs Front) ของคลอไรด์ไอออนภายใต้สภาวะการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงจะเดินทางมาถึงก่อนเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้าของคลอไรด์ไอออนภายใต้สภาวะการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปมี

ผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนในตัวกลางรูพรุนที่ดำเนินการทดสอบ โดยที่อัตราการไหลสูงขึ้นทำให้คลอไรด์ไอออนเดินทางได้เร็วขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะรูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์ ผลการทดลองในส่วนนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีตที่ผ่านมา (Putthividhya 2004) เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นสารเทอร์เซอร์ที่เจือยต่อปฏิกิริยามีอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับอัตราการไหลของโมเลกุลน้ำในตัวกลางรูพรุนหรืออีกนัยหนึ่งคือพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของคลอไรด์ไอออนจะเสมือนพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในตัวกลางรูพรุนนั่นเอง

จากการคำนวณค่าการแพร่ของสารเทอร์เซอร์ด้วยรูปเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์ในดินทดลองทั้ง 3 ชุดทั้งพบว่าค่าการแพร่ของสารเทอร์เซอร์ที่ด้านหน้าของเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์มีค่าน้อยกว่าด้านหลังของเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์ เนื่องจากกระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้น (Back Diffusion) และเมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลพบว่าค่าการแพร่ของสารเทอร์เซอร์ด้านหน้าเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์และด้านหลังเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทอร์เซอร์ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงมีค่ามากกว่าที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเนื่องจากที่อัตราการไหลสูงน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และมีการไหลผ่านรูพรุนขนาดเล็กมีค่าน้อยดังนั้นการแพร่กระจายของสารเทอร์เซอร์จึงมีค่าลดน้อยลงทำให้ค่าการแพร่มีค่าลดลง ค่าการแพร่ของดินทดลองทั้ง 3 ชุดแสดงดังตารางที่ 4-2

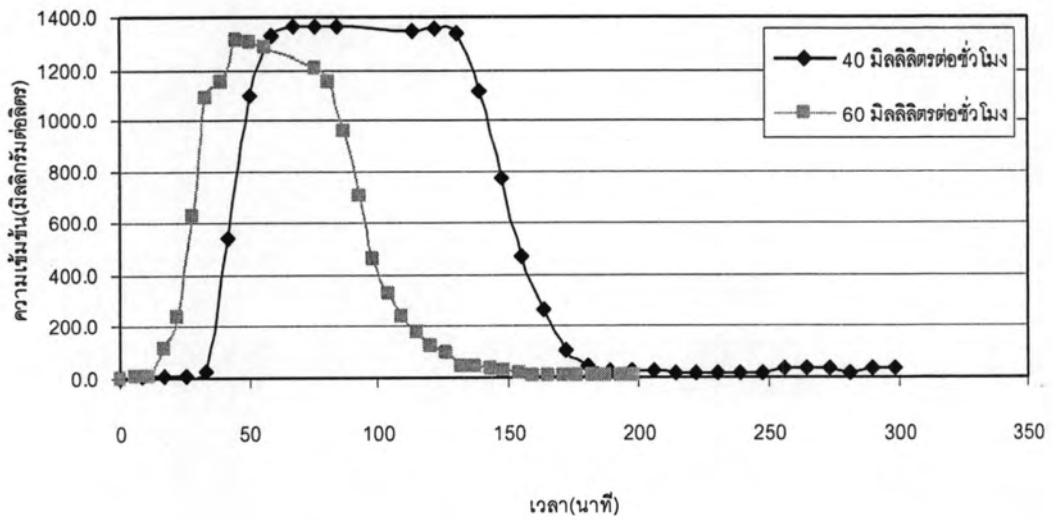
ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนที่คำนวณได้จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองกายรูป ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4-3 จำแนกตามประเภทดินทดลองชุดที่ 1-3 และจำแนกตามอัตราการไหลของน้ำในระบบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนที่จะกล่าวถึงต่อไปในบทนี้

ตารางที่ 4-1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเทเซอร์ก่อนเข้าคอลัมน์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง

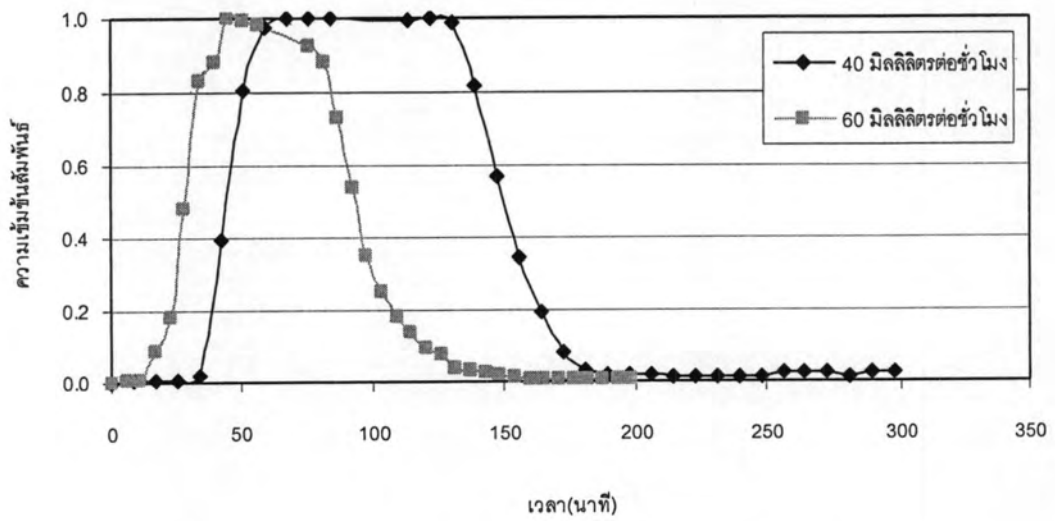
อัตราการไหล	ดินชุดที่	ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเทเซอร์ในชุดการทดลอง (C_0)
อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1	1362.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
	2	1215.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
	3	1334.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1	1309.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
	2	1215.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
	3	1288.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4-2 ค่าการแพร่ของดินทดลองทั้ง 3 ชุด

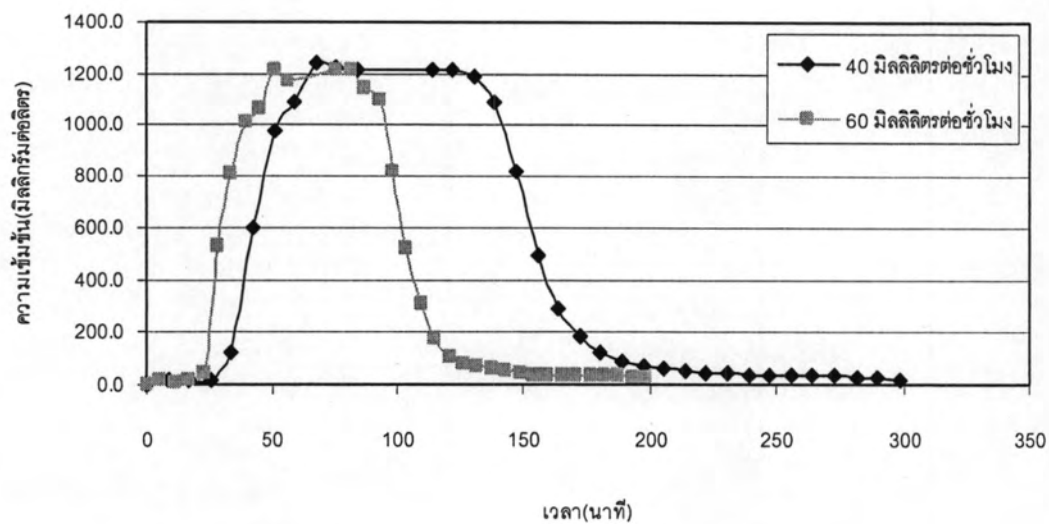
อัตราการไหล	ดินทดลอง	การแพร่ (ม.)	
		เส้นโค้ง ด้านหน้า	เส้นโค้ง ด้านหลัง
อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	ดินชุดที่ 1	2.1	8.0
	ดินชุดที่ 2	3.7	12.2
	ดินชุดที่ 3	1.7	6.6
อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	ดินชุดที่ 1	1.8	6.8
	ดินชุดที่ 2	2.4	4.0
	ดินชุดที่ 3	0.7	2.5



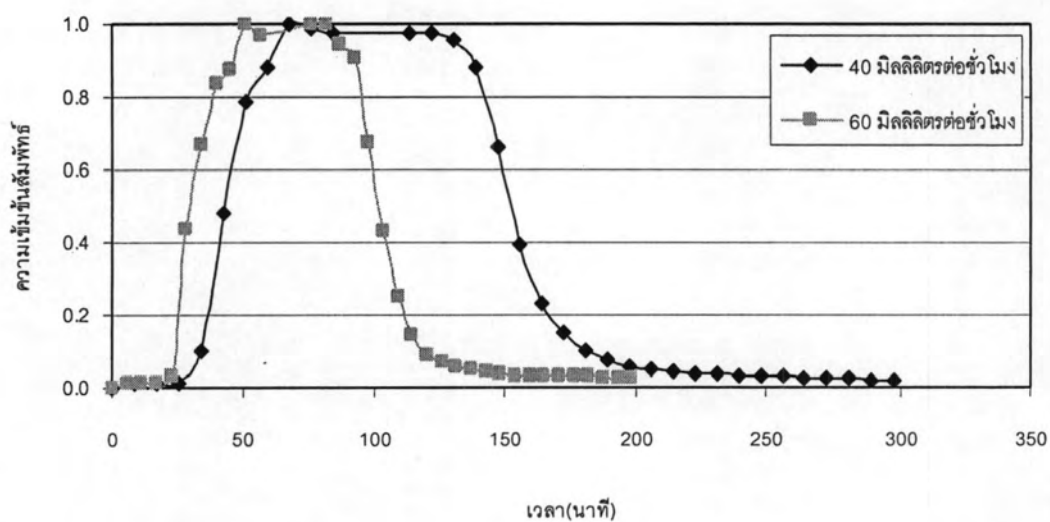
รูปที่ 4-1 ความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 1



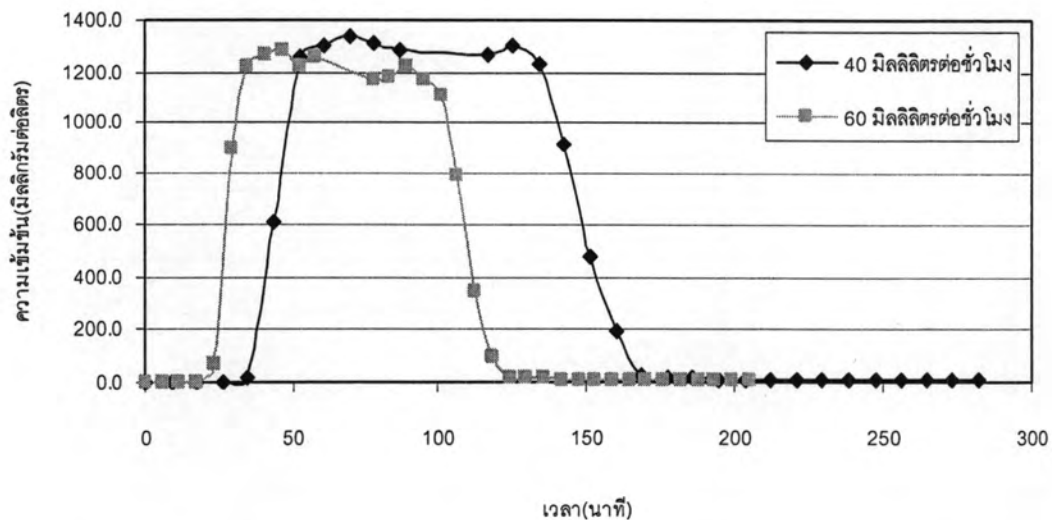
รูปที่ 4-2 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 1



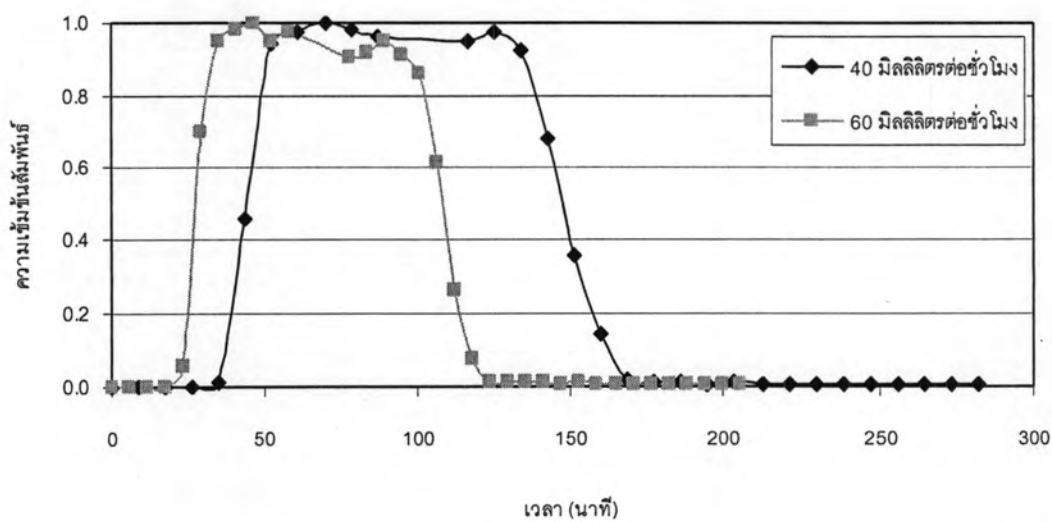
รูปที่ 4-3 ความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 2



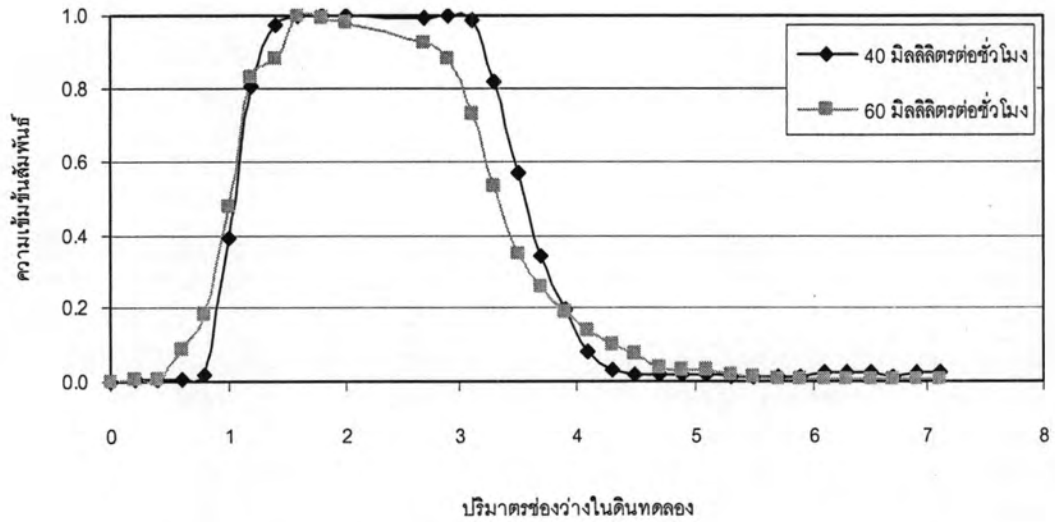
รูปที่ 4-4 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 2



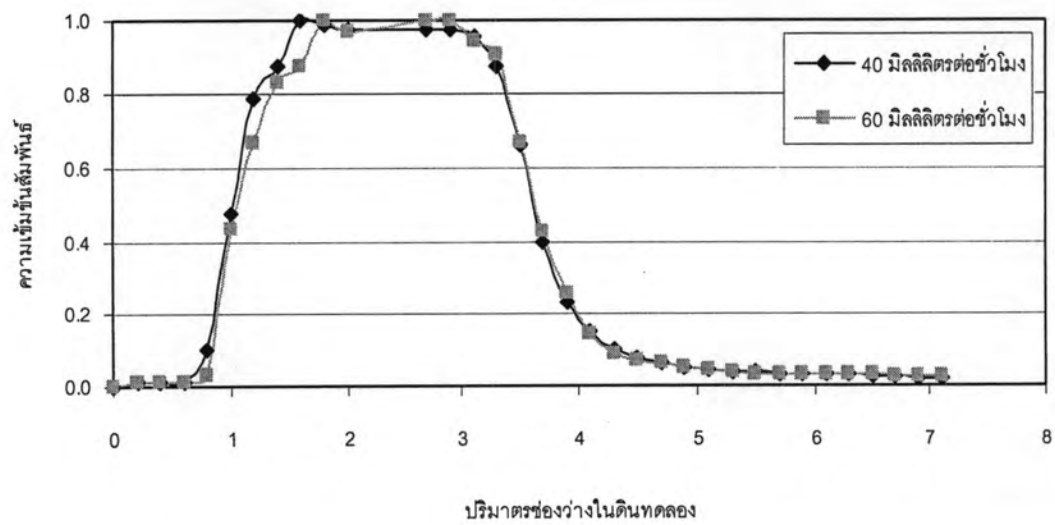
รูปที่ 4-5 ความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 3



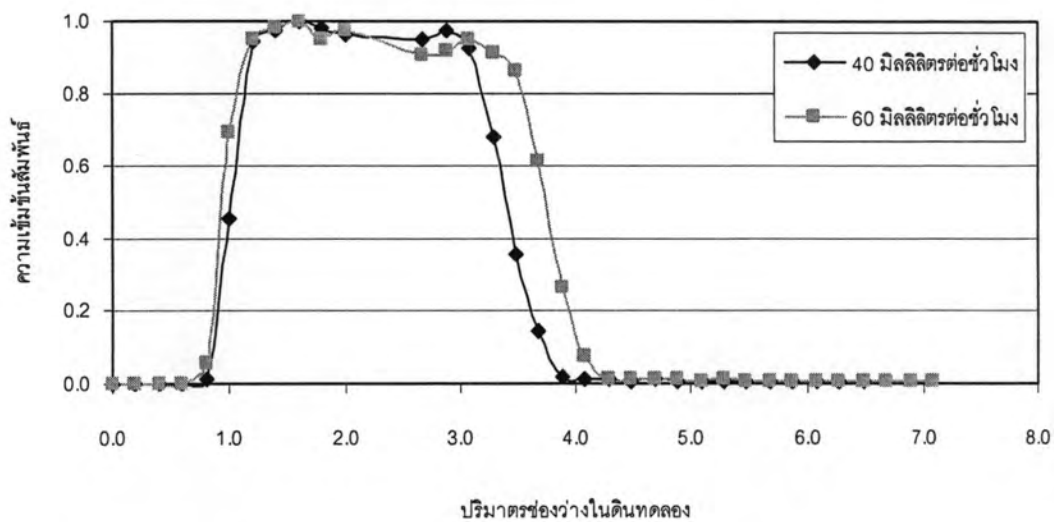
รูปที่ 4-6 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 3



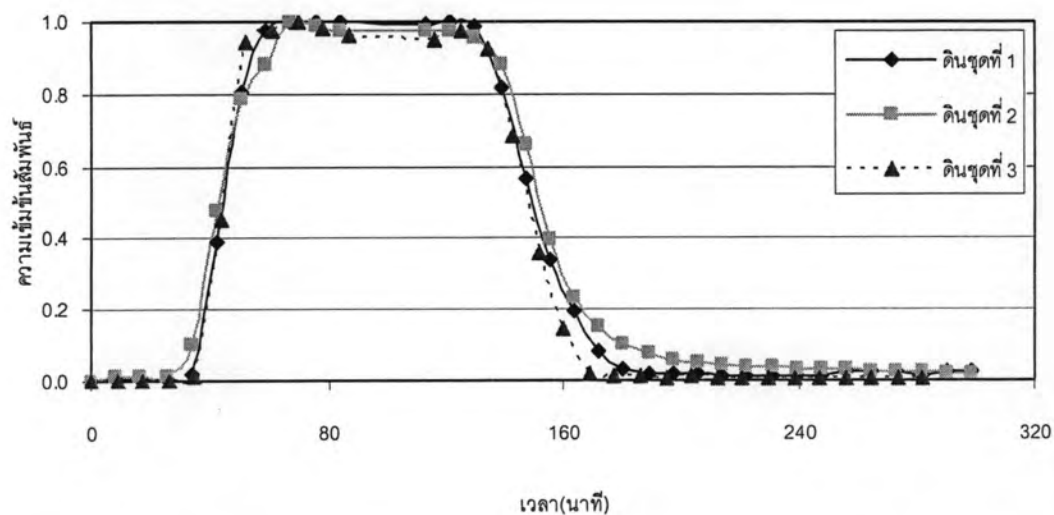
รูปที่ 4-7 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1



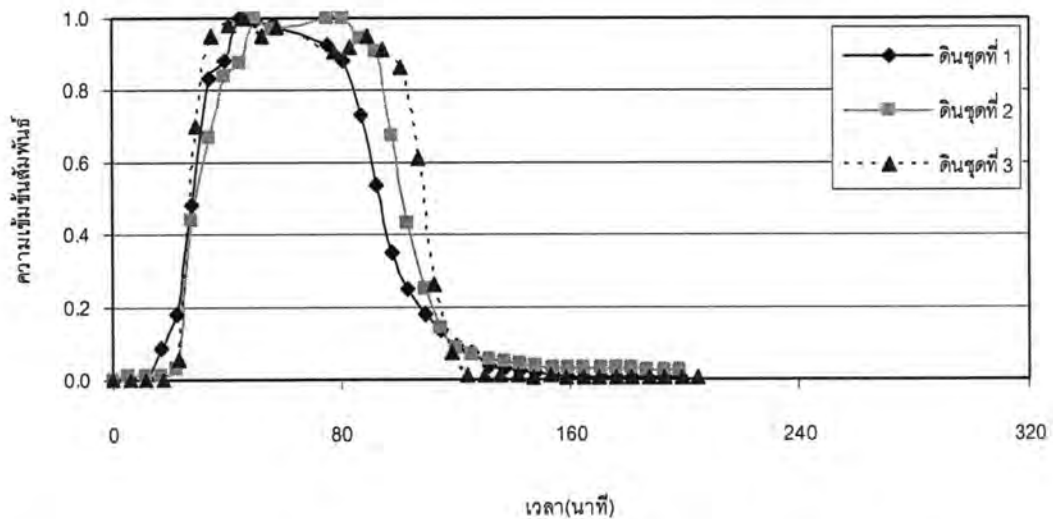
รูปที่ 4-8 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2



รูปที่ 4-9 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3



รูปที่ 4-10 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกันด้วยดินชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-11 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหลสูง 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4-3 ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารเทอร์เซอร์ผ่านดินทดลอง

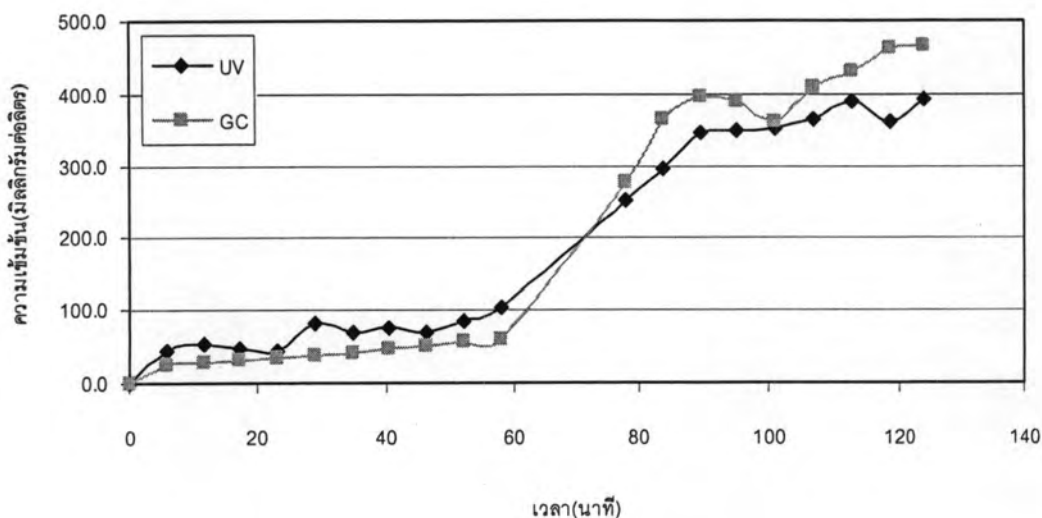
อัตราการไหลของน้ำในระบบ	ดินชุดที่ 1	ดินชุดที่ 2	ดินชุดที่ 3
อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	101.1 นาที	104.3 นาที	97.5 นาที
อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	64.5 นาที	70.8 นาที	68.9 นาที

4.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนโดยใช้เครื่องยูวี-วิชิเบิลและเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

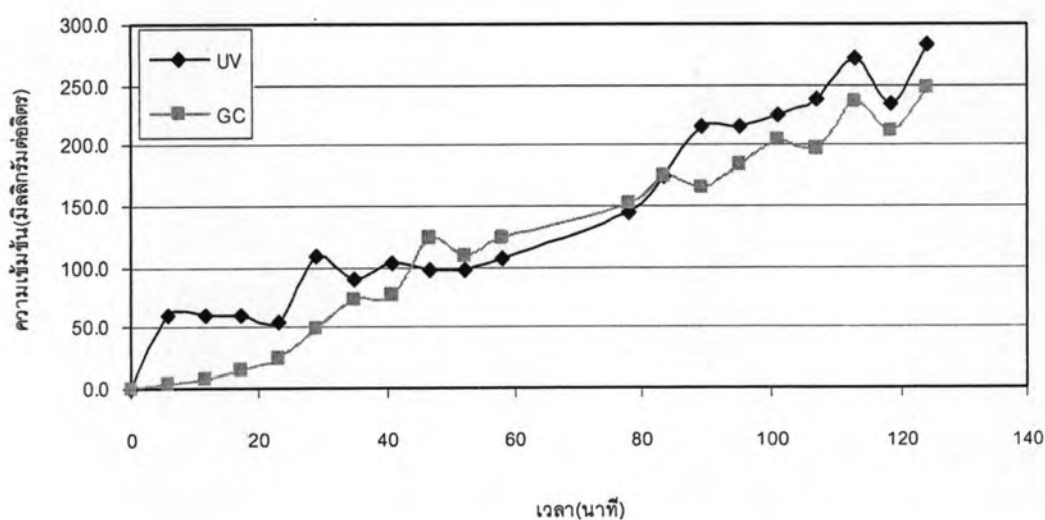
เทคนิคการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยรวมทั้งสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีน โดยปกติแล้วจะดำเนินการตรวจวัดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (กรมควบคุมมลพิษ (2543)) ดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 3 แม้ว่าการใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีในการตรวจวิเคราะห์สารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนจะมีความถูกต้องสูงและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายแต่ก็มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นวัตถุประสงค์การศึกษาในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาเทคนิคการตรวจวิเคราะห์เพื่อวัดปริมาณสารปนเปื้อนไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลตามคอนดิชันที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์สารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลกับผลการวิเคราะห์อ้างอิงด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่เป็นที่ยอมรับและใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ได้ดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์ของเครื่องยูวี-วิชิเบิล โดยใช้สารละลายสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนมาตรฐาน

ในน้ำกลั่นที่เตรียมขึ้นเพื่อสร้างเส้นปรับเตรียมและตัวอย่างน้ำจากการทดลองโดยใช้ดินชุดที่ 3 ภายใต้สภาวะการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเป็นตัวแทนในการศึกษา ตัวอย่างที่ดำเนินการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 19 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และรูปที่ 4-13

ผลการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนที่ตรวจวิเคราะห์โดยใช้สารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นโดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องยูวี-วิซิเบิลมีค่าใกล้เคียงกันมาก (หัวข้อ 3.1.6) นอกจากนี้คอนดิชันที่พัฒนาขึ้นโดยเฉพาะในการศึกษานี้เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนมีความเหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในน้ำตัวอย่างจากการทดลองในรูปแบบจำลองกายภาพชนิดคอลัมน์ได้ต่อไป ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในตัวอย่างน้ำผ่านคอลัมน์จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยในตัวกลางรูปทรงชนิดที่ 3 (รูปที่ 4-12 และ รูปที่ 4-13) พบว่าแนวโน้มโดยทั่วไปของความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในตัวอย่างน้ำผ่านคอลัมน์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องยูวี-วิซิเบิล มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดพบว่าการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลนั้นค่าความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนที่ความเข้มข้นต่ำในช่วงแรกของการทดลองดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่สูงกว่าเส้นกราฟที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ในขณะที่เดียวกันการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลนั้นมีแนวโน้มความเข้มข้นของสารเบนซีนที่ความเข้มข้นต่ำกว่าในช่วงท้ายของการทดลอง ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่ต่ำลงของเครื่องยูวี-วิซิเบิล เมื่อดำเนินการคำนวณค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ใต้กราฟทั้งสองพบว่ามีค่าแตกต่างกันอยู่ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ เป็นที่น่าสังเกตว่าความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในตัวอย่างน้ำจากคอลัมน์ที่ทำการทดสอบที่ตรวจวัดด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีสูงกว่าเมื่อดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายมาตรฐานเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนที่เตรียมจากน้ำกลั่น (หัวข้อ 3.1.6) ข้อสันนิษฐานเบื้องต้นสำหรับเหตุการณ์นี้อาจเกิดจากความขุ่นของตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ เนื่องจากน้ำตัวอย่างนี้เดินทางผ่านตัวกลางรูปทรงจำนวนมากมีการละลายของอนุภาคขนาดเล็กจากตัวกลางรูปทรงลงในน้ำทำให้ตัวอย่างมีลักษณะขุ่นอย่างชัดเจน ส่งผลให้ค่าแอบซอร์บแนนซ์ของรังสีมีค่าคลาดเคลื่อน



รูปที่ 4-12 ความเข้มข้นของสารเบนซีน ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 4-13 ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีน ณ เวลาต่างๆ

4.1.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมพัลส์ด้วยน้ำ

เนื่องจากสารปนเปื้อนส่วนใหญ่ที่มีแหล่งกำเนิดจากภาคอุตสาหกรรมที่พบได้บ่อยครั้งในชั้นน้ำบาดาลคือสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยได้แก่สารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน สารทั้งสองนี้มีลักษณะเฉพาะอีกประการหนึ่งคือเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติแยกชั้นออกจากน้ำได้อย่างชัดเจนเนื่องจากแรงตึงผิวที่สูงและความสามารถในการละลายในน้ำได้จำกัดส่งผลให้

แหล่งกำเนิดของสารปนเปื้อนตกค้างอยู่ในชั้นดินและชั้นน้ำบาดาลได้เป็นเวลานานก่อให้เกิดน้ำบาดาลปนเปื้อนแผ่ขยายตัวในวงกว้างส่งผลกระทบต่อมนุษย์, สัตว์และสิ่งแวดล้อมอย่างมหาศาล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นดำเนินการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนในเฟสสารละลายผ่านตัวกลางรุกรานธรรมชาติชนิดที่ 1-3 ภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมิตัวด้วยน้ำ ตัวกลางรุกรานที่ใช้ในการทดลองนี้คือตัวกลางรุกรานชุดเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านตัวกลางรุกรานธรรมชาติภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมิตัวด้วยน้ำดังกล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้

ผลการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนในเฟสสารละลายผ่านดินทดลองชุดที่ 1-3 ภายใต้สภาวะการไหลแบบอิมิตัวด้วยน้ำ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4-14 ถึง 4-25 ในรูปของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนซึ่งแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนหรือเบนซีนในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ (แกน Y) กับเวลาที่ดำเนินการทดลอง (แกน X) และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนซึ่งแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนหรือเบนซีนในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ต่อความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนหรือเบนซีนเริ่มต้น (แกน Y) กับเวลาที่ดำเนินการทดลอง (แกน X) การแสดงผลการศึกษาในรูปของเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อน นั้นมีข้อดีคือสามารถนำผลการทดลองที่ได้จากคอลัมน์ต่างๆไปใช้เปรียบเทียบกันได้โดยตรงแม้ว่าปริมาณสารไตรคลอโรเอธิลีนหรือเบนซีนเริ่มต้นในแต่ละการทดลองจะแตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของสารเหล่านี้ที่สามารถตรวจวิเคราะห์พบในน้ำตัวอย่างผ่านคอลัมน์ได้

เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจากการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 4-14) พบว่าค่าความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนที่ตรวจวิเคราะห์ได้ในตัวอย่างน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนสูงสุดประมาณ 220 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับแล้วจึงค่อยๆลดความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าใกล้ศูนย์ในที่สุด ส่งผลให้ลักษณะของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนมีรูปคล้ายระฆังคว่ำแบบไม่สมมาตรโดยเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนมีลักษณะเบ้ไปด้านซ้ายมืออย่างชัดเจน เป็นที่สังเกตว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารไตรคลอโรเอธิลีนที่ตรวจวัดในน้ำตัวอย่างจากคอลัมน์นั้นต่ำกว่าของสารเบนซีน ทั้งที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Influent Concentrations) ของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนที่เตรียมก่อนเริ่มการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

คือ 711 และ 689 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่งผลให้เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนมีค่าสูงสุดต่ำกว่าหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4-15 นอกจากนี้ความชันของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนในช่วงขาขึ้น (ก่อนถึงค่าสูงสุด) มีค่ามากกว่าความชันในช่วงขาลง (หลังจากค่าสูงสุด) อย่างชัดเจน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเทลลิงเอฟเฟค (Tailing Effects) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แสดงถึงกระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้นของสารปนเปื้อนออกจากตัวกลางที่มีขนาดเล็กมากๆ เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนมีลักษณะไม่สมมาตรอย่างชัดเจนประกอบกับความชันด้านขาขึ้นของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนไม่เท่ากับความชันขาลงล่วงหน้าบ่งบอกถึงกระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในช่วงหลังเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนจากสารละลายผสมของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนไปเป็นการสูบน้ำด้วยน้ำกลั่นมีค่าสูงกว่ากระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในตอนแรกของการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนจากการสูบน้ำกลั่นไปสู่การสูบน้ำด้วยสารละลายผสมของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้มักพบในตัวกลางรูพรุนที่มีขนาดเล็กมากๆ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เช่น ดินเหนียว (Clay) หรือตัวกลางรูพรุนที่มีลักษณะพื้นผิวซับซ้อนมากๆ (Putthividhya (2004))

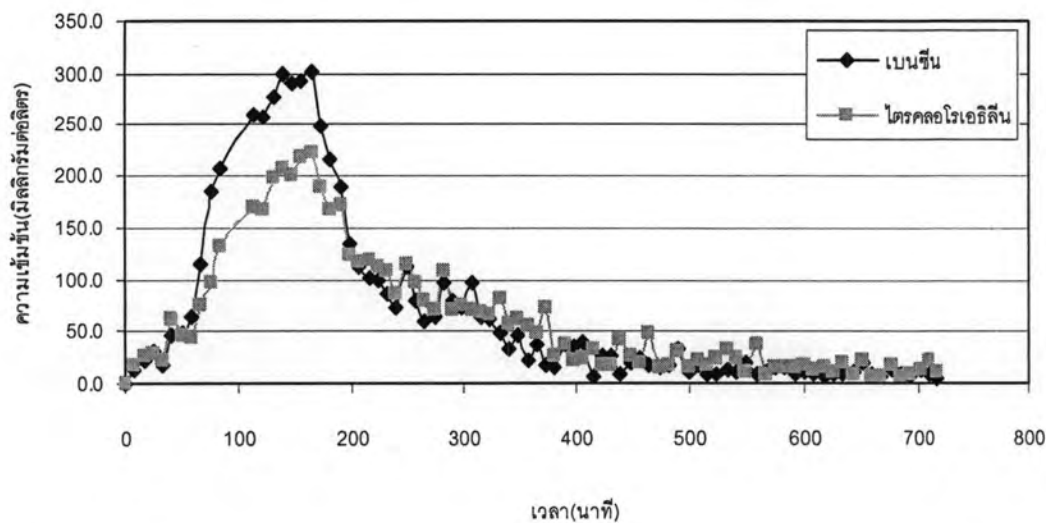
เมื่อดำเนินการทดลองลักษณะเดียวกันโดยใช้ดินทดลองชุดต่างๆตามที่ได้จำแนกประเภทเป็นดินทดลองชุดที่ 1-3 ดังกล่าวในบทที่ 3 นั้นพบว่า ลักษณะเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนและเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนยังคงมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน กล่าวคือมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำไม่สมมาตร ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนที่ตรวจพบในตัวอย่งน้ำต่ำกว่า 1.0 ความชันขาขึ้นของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน สูงกว่าความชันขาลงของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนและเทลลิงเอฟเฟคที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายๆของการทดลอง ยกเว้นในกรณีนี้ที่ดำเนินการทดลองด้วยดินทดลองชุดที่ 2 พบว่าเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนมีความคล้ายคลึงกันค่อนข้างมากจนเกือบจะซ้อนทับกัน และให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน ในน้ำตัวอย่างผ่านคอลัมน์สูงที่สุด แตกต่างจากดินชนิดที่ 1 และ 3 อย่างชัดเจน

จากเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนและเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโร

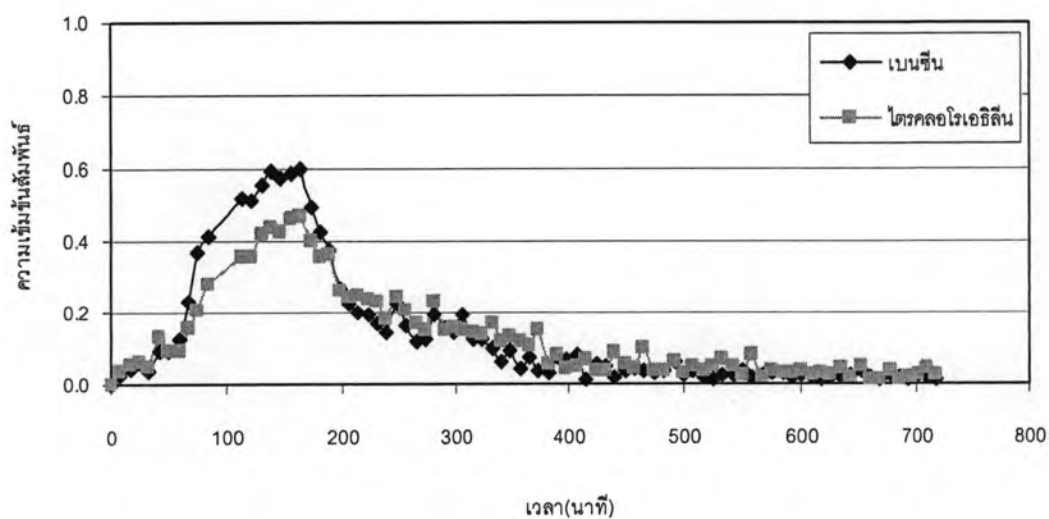
โรเอธิลินและเบนซีนสามารถคำนวณเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนผ่านตัวกลางรูพรุนได้ ตัวอย่างการคำนวณค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนผ่านตัวกลางรูพรุนแสดงในภาคผนวก ข ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนผ่านตัวกลางรูพรุนในดินทดลองชุดที่ 1-3 สรุปไว้ในตารางที่ 4-4 ข้อแตกต่างสำคัญที่สังเกตได้คือ เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนในดินทดลองชุดที่ 1-3 ภายใต้สภาวะการไหลคงที่นั้นมีค่าไม่คงที่ โดยที่ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสาร ไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีน มีค่าน้อยที่สุดสำหรับดินชนิดที่ 2 ซึ่งเป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินเฉลี่ยใหญ่ที่สุด รองลงมาคือดินทดลองชุดที่ 1 และ 3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนในการทดลองโดยใช้ดินชนิดเดียวกันและอัตราการไหลคงที่พบว่า เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินมีค่ามากกว่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารเบนซีน ซึ่งเป็นจริงสำหรับดินชุดที่ 1-3 ที่ได้ดำเนินการทดสอบ ดังนั้นจากผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองกายภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนในตัวกลางรูพรุนชนิดต่างๆสามารถสรุปได้ว่าตัวกลางรูพรุนชนิดต่างๆที่ดำเนินการทดสอบมีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีน มีผลต่อรูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนและเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้วยเช่นกัน นอกจากนี้พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนในดินชุดเดียวกันภายใต้อัตราการไหลคงที่เท่ากันยังมีความแตกต่างกันด้วย อันเกิดจากกระบวนการดูดซับติดผิวเป็นหลัก ดังจะได้อธิบายเพิ่มเติมต่อไป

นอกจากนี้ได้ดำเนินการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีน ในตัวกลางรูพรุนชุดที่ 1-3 ด้วย ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4-14, 4-16, 4-18, 4-20, 4-22 และ 4-24 พบว่าเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ตัวกลางรูพรุนชนิดเดียวกันและปรับอัตราการไหลของน้ำในระบบทดลองให้สูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้มีการตรวจพบสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนในตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น ดังจะสังเกตได้จากเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนด้านหน้าภายใต้สภาวะการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงจะเดินทางมาถึงด้านท้ายคอลัมน์ก่อนเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลินและเบนซีนด้านหน้าภายใต้สภาวะการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบยังทำให้รูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลินมีความใกล้เคียงกับเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเบนซีนมากขึ้น โดยเฉพาะสำหรับการทดลองที่ใช้ดินชุดที่ 1 และ 3 เมื่อทำการคำนวณค่าเวลาเฉลี่ยในการ

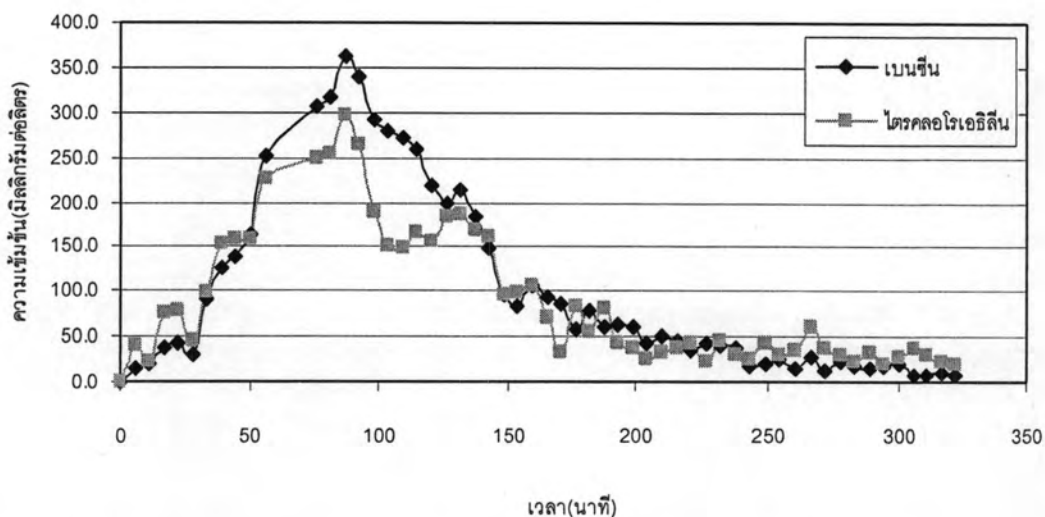
เดินทางของสารไตรโคลโรเอธิลีนและเบนซีนของระบบต่างๆพบว่าการปรับอัตราการไหลให้สูงขึ้นส่งผลให้เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารไตรโคลโรเอธิลีนและเบนซีนลดลง ดังแสดงการเปรียบเทียบในตาราง 4-4 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสารไตรโคลโรเอธิลีนและเบนซีนในตัวกลางรูพรุนที่ดำเนินการทดสอบ โดยที่อัตราการไหลสูงขึ้นทำให้สารไตรโคลโรเอธิลีนและเบนซีนเดินทางได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรโคลโรเอธิลีนและเบนซีนและเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรโคลโรเอธิลีนและเบนซีน โดยเฉพาะสำหรับสารไตรโคลโรเอธิลีนที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อน เข้าใกล้เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเบนซีนมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเริ่มต้นของสารเบนซีนและไตรโคลโรเอธิลีน (C_0) แสดงดังตาราง 4-4



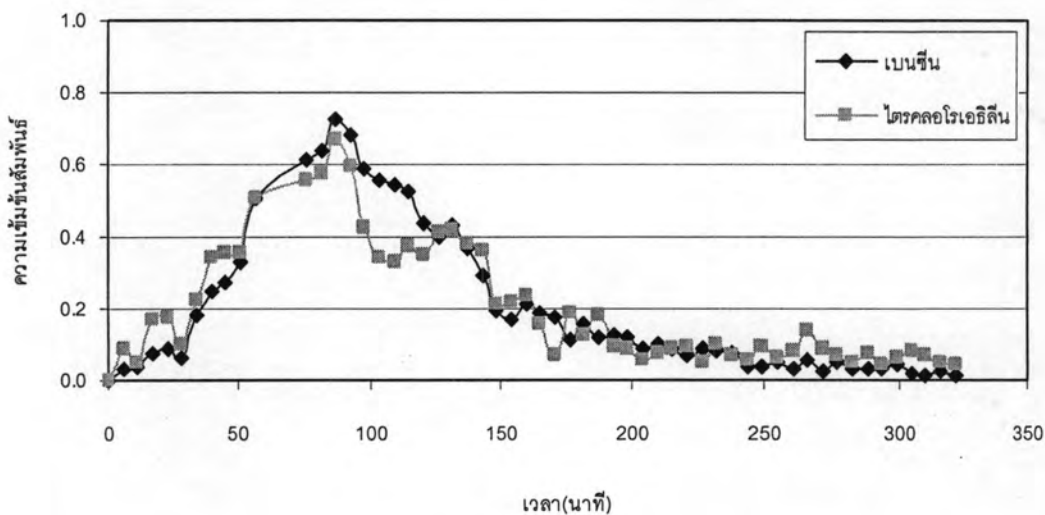
รูปที่ 4-14 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอทิลีนและเบนซีน เมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



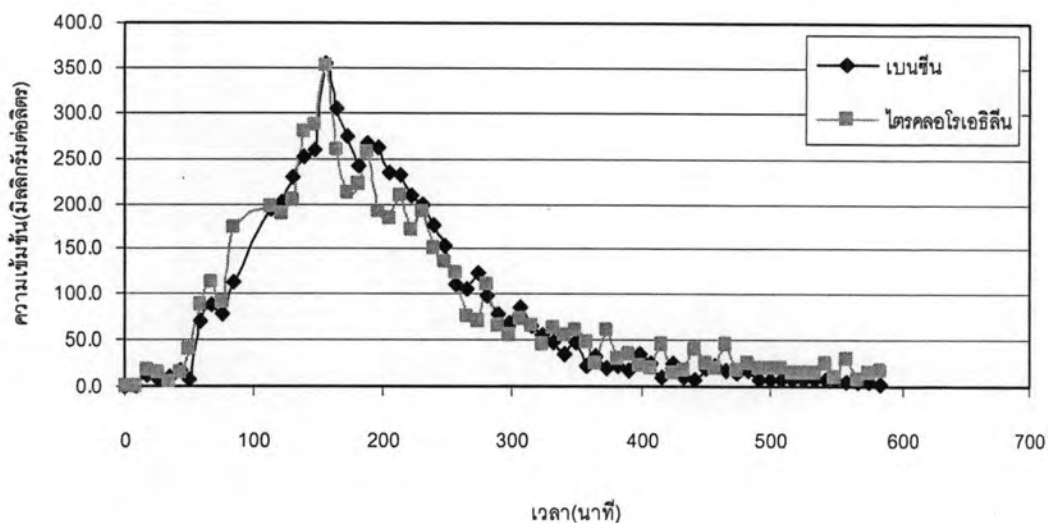
รูปที่ 4-15 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอทิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



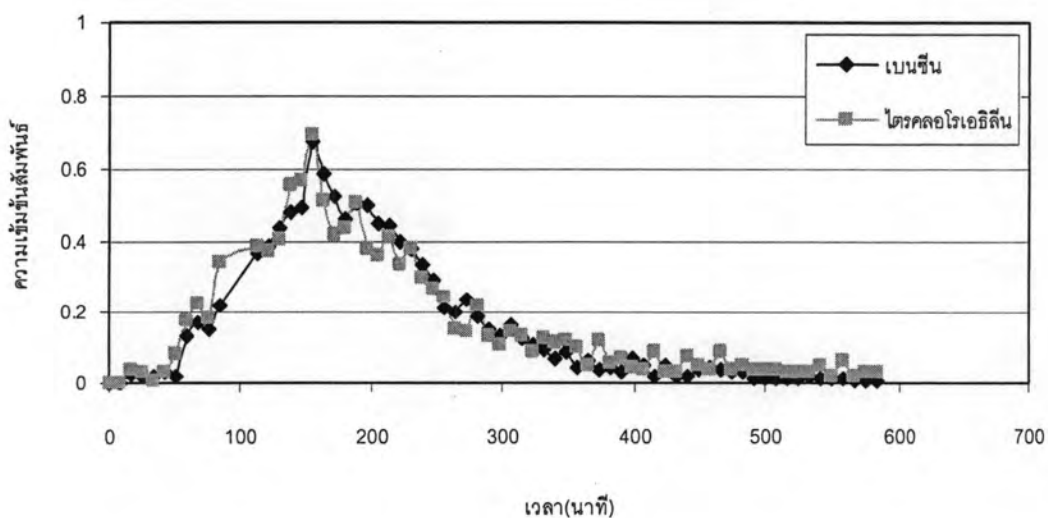
รูปที่ 4-16 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอทิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



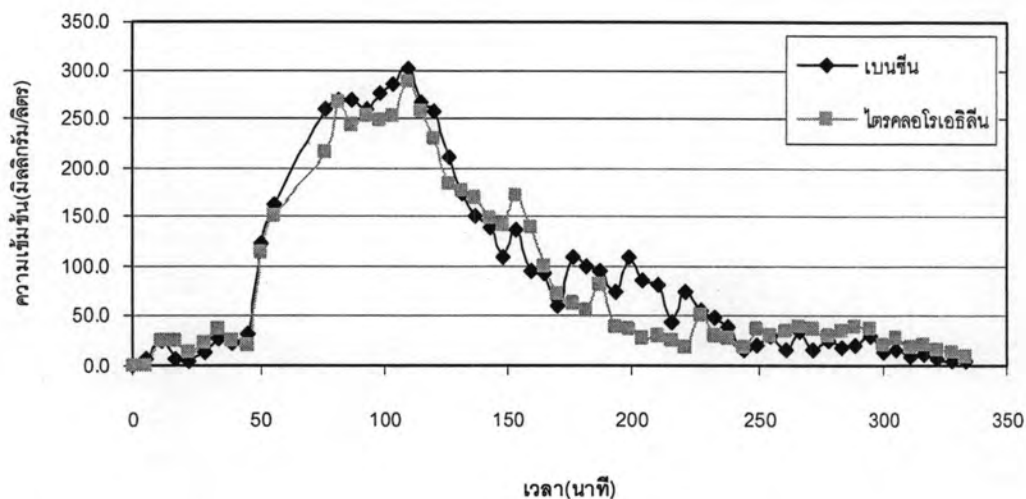
รูปที่ 4-17 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอทิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



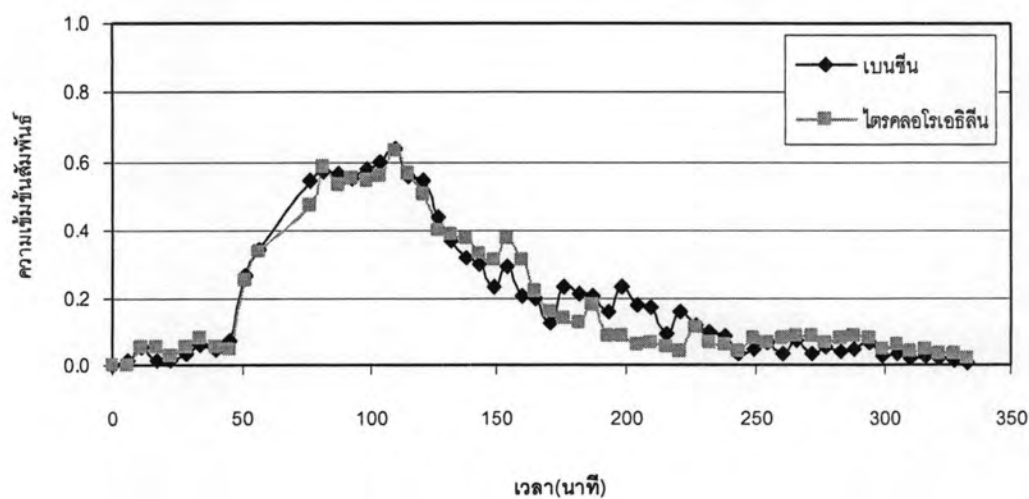
รูปที่ 4-18 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอทิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



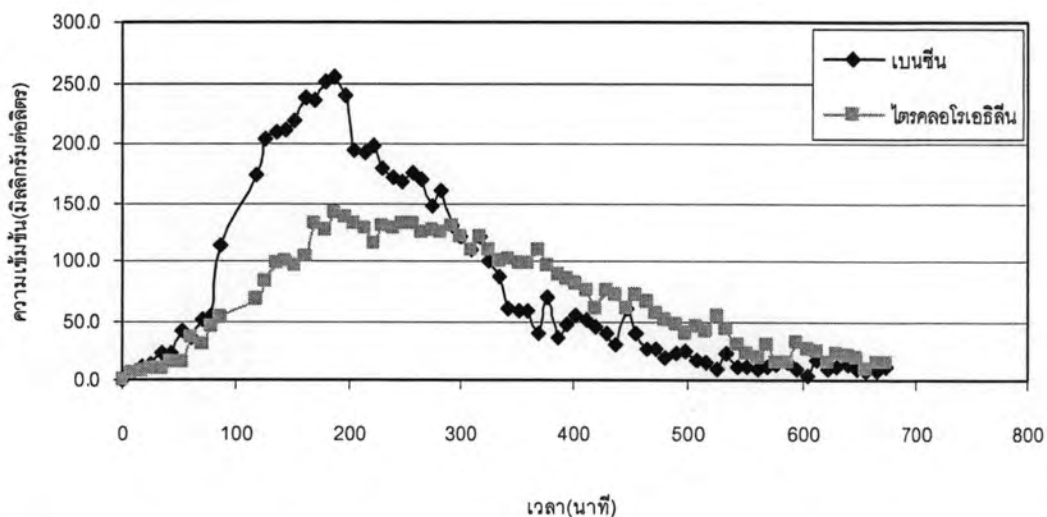
รูปที่ 4-19 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอทิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



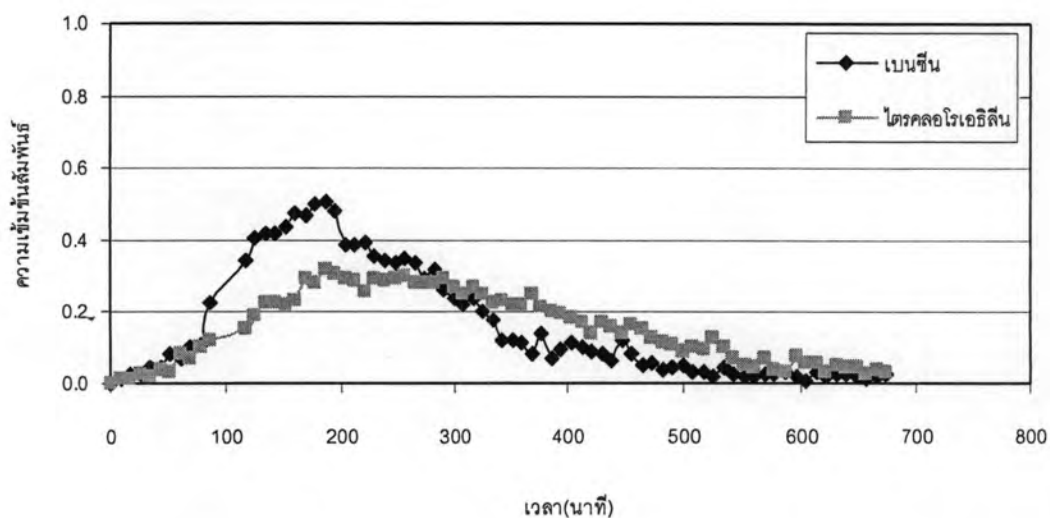
รูปที่ 4-20 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคอลลอโรเอธิลีนและเบนซินเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



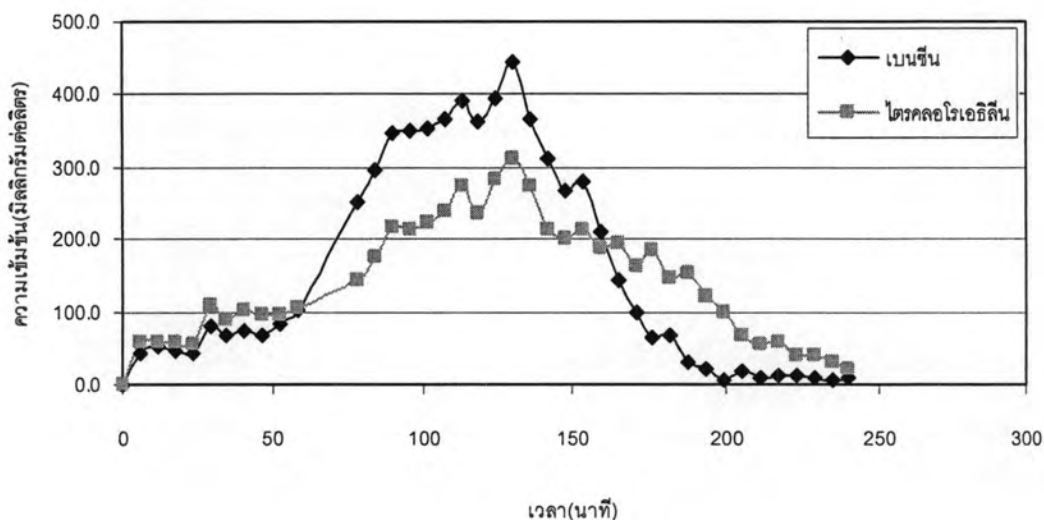
รูปที่ 4-21 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคอลลอโรเอธิลีนและเบนซินเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



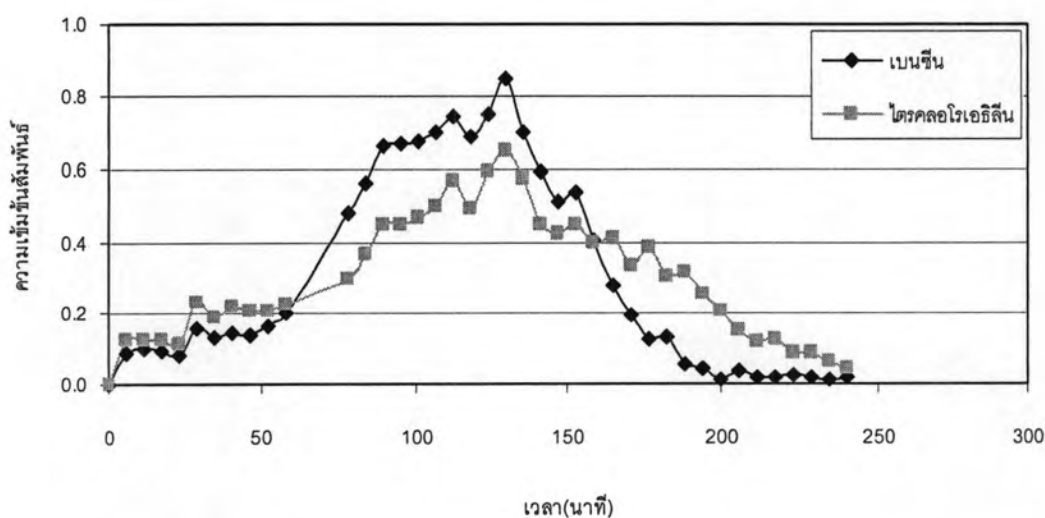
รูปที่ 4-22 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-23 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

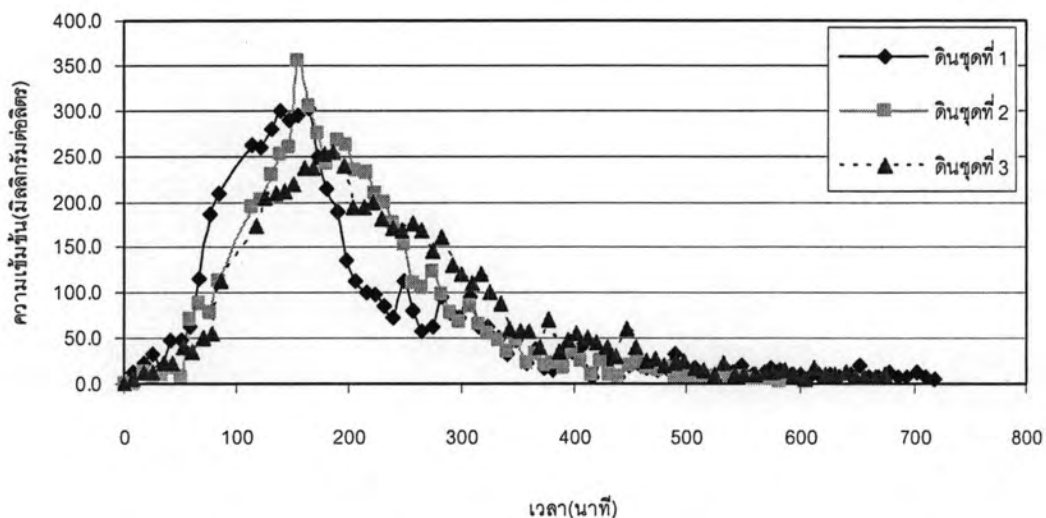


รูปที่ 4-24 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคอลลอโรเอธิลินและเบนจีน เมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

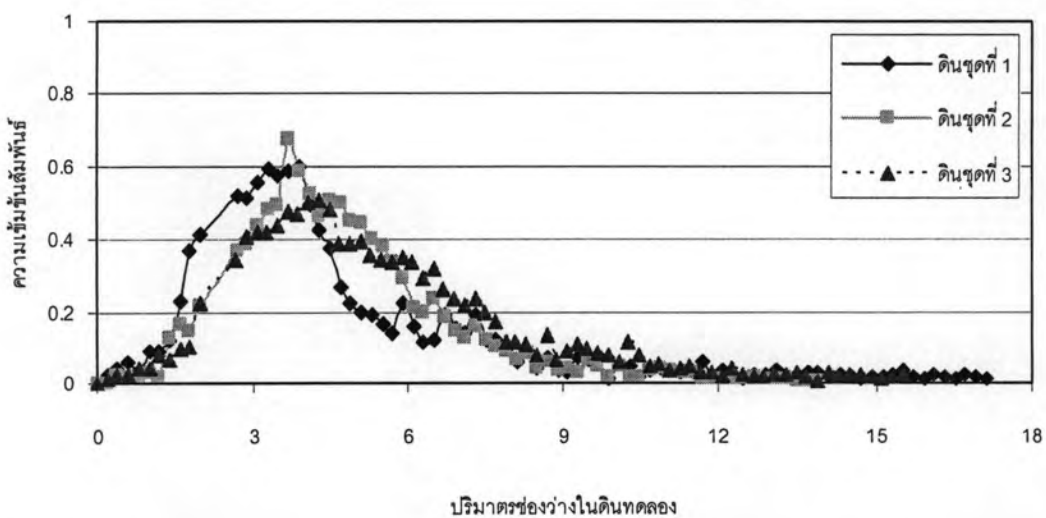


รูปที่ 4-25 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคอลลอโรเอธิลินและเบนจีน เมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

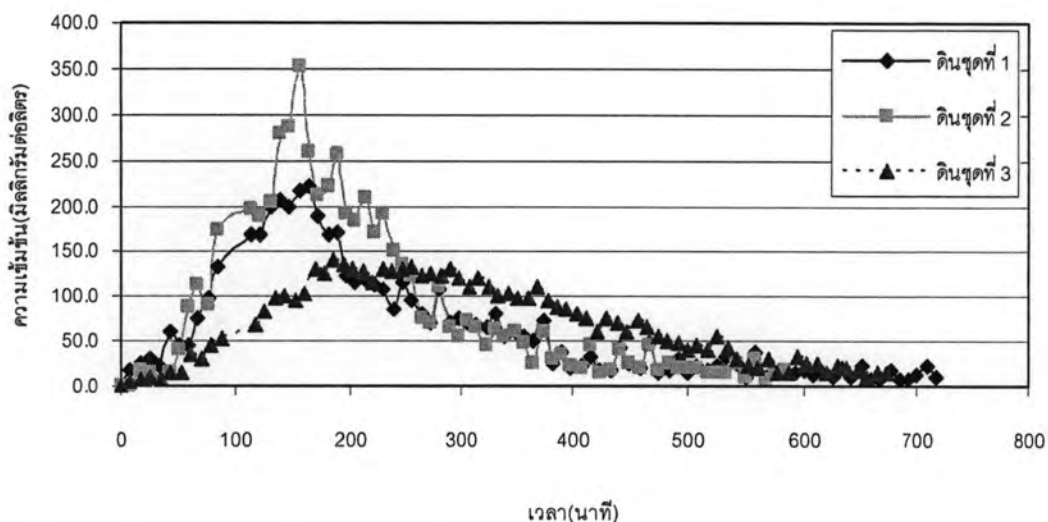
เมื่อนำเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนและเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน ที่ได้จากการศึกษามาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทรเซอร์และเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทรเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4-34 และ 4-35 พบว่าพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีน, เบนซีนและคลอไรด์ไอออนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือแม้ว่ารูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนและ เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนทั้งสามจะคล้ายรูประฆังคว่ำที่ไม่สมมาตรคล้ายคลึงกัน แต่เทลลิงเอฟเฟคนั้น จะพบได้เฉพาะในกรณีของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเท่านั้น สำหรับคลอไรด์ไอออนที่เป็นสารเทรเซอร์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา นั้นไม่สังเกตเห็นเทลลิงเอฟเฟคอย่างชัดเจนนัก ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดของคลอไรด์ไอออนที่ตรวจวัดได้ในน้ำตัวอย่างเมื่อดำเนินการทดลองกับดินทดลองชนิดที่ 1-3 จะมีค่าเท่ากับ 1.0 ในขณะที่ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนในดินชนิดที่ 1-3 ต่ำกว่า 1.0 อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้าและเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนทั้งสามชนิดพบว่าเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้าของคลอไรด์ไอออนเดินทางมาถึงก่อนสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน ในขณะที่เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้าของไตรคลอโรเอธิลีนเดินทางออกมาได้ช้าที่สุด นอกจากนี้ตำแหน่งที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดและตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนทั้งสามนั้นแตกต่างกันออกไป โดยที่ตำแหน่งที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดและจุดศูนย์กลางของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นก่อนสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน เมื่อดำเนินการทดลองโดยปรับอัตราการไหลของน้ำให้สูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ไม่มีผลต่อลักษณะเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนและเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเทรเซอร์และรูปร่างของเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนดังแสดงในรูป 4-37 ยังคงคล้ายคลึงกับเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 4-34) แต่ตำแหน่งที่เกิดความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจะเกิดได้ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดสอบต่ำกว่า นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.47 และ 0.60 เป็น 0.67 และ 0.73 เมื่อมีการปรับอัตราการไหลสูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



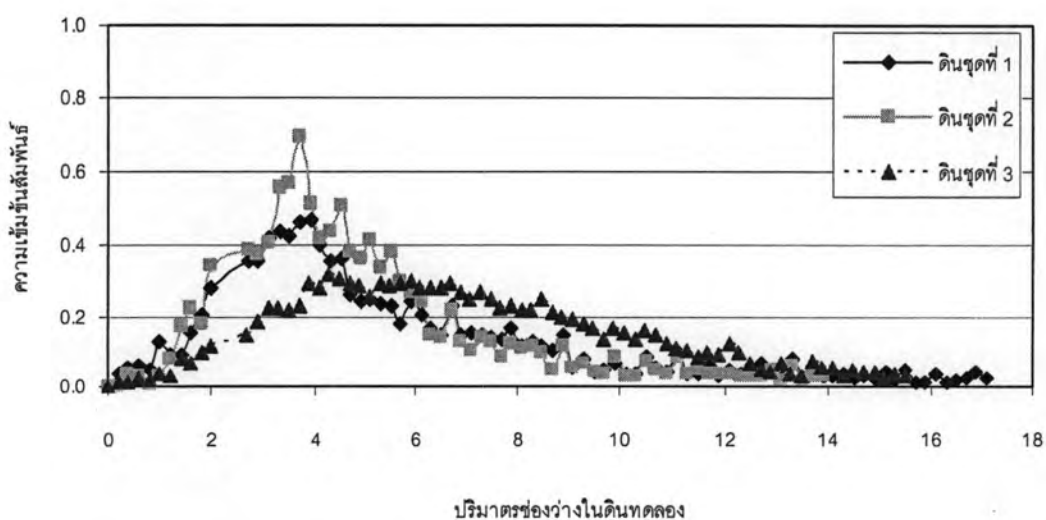
รูปที่ 4-26 ความเข้มข้นของสารเบนซีนในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



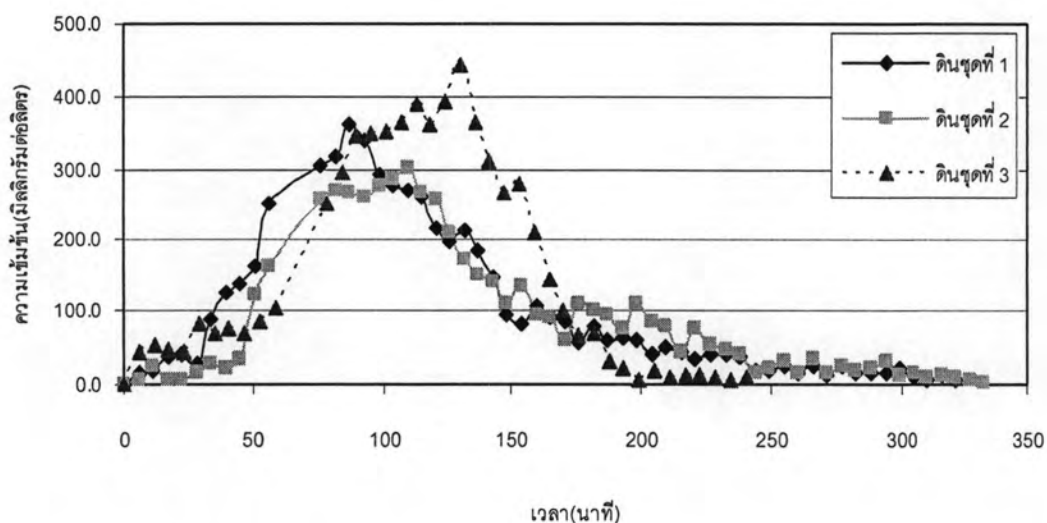
รูปที่ 4-27 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเบนซีนที่ปริมาตรช่องว่างของดินทดลองทั้ง 3 ชุดที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



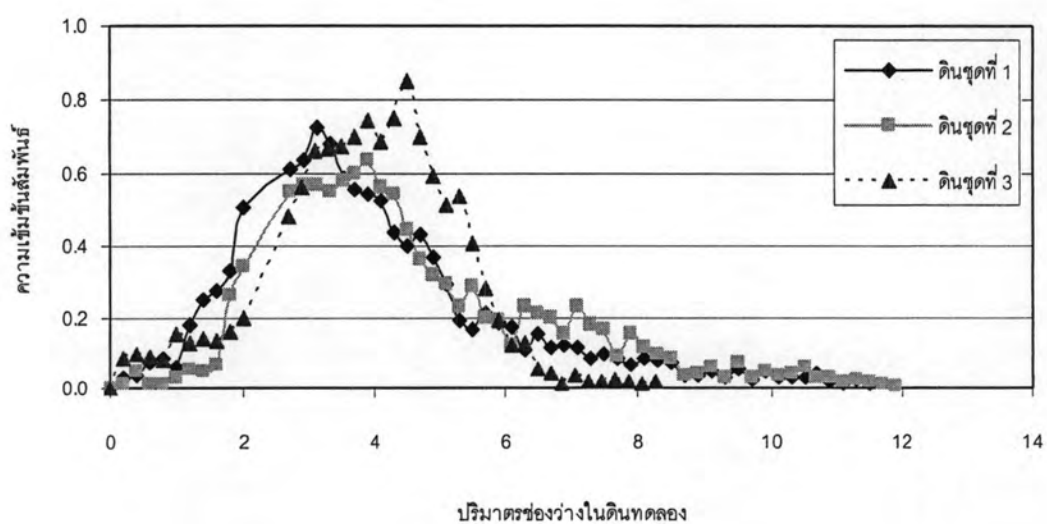
รูปที่ 4-28 ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเฮอริสซินในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



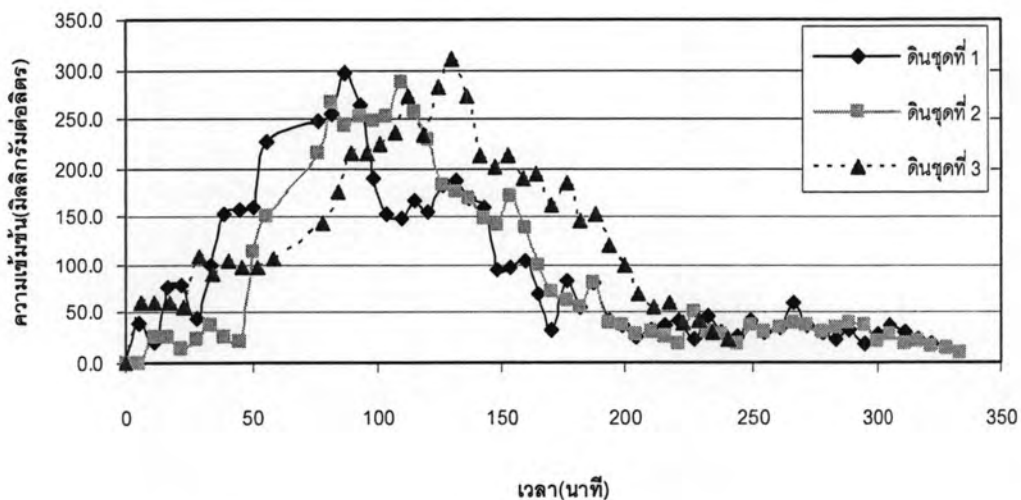
รูปที่ 4-29 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเฮอริสซินที่ปริมาตรช่องว่างของดินทดลองทั้ง 3 ชุดที่อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



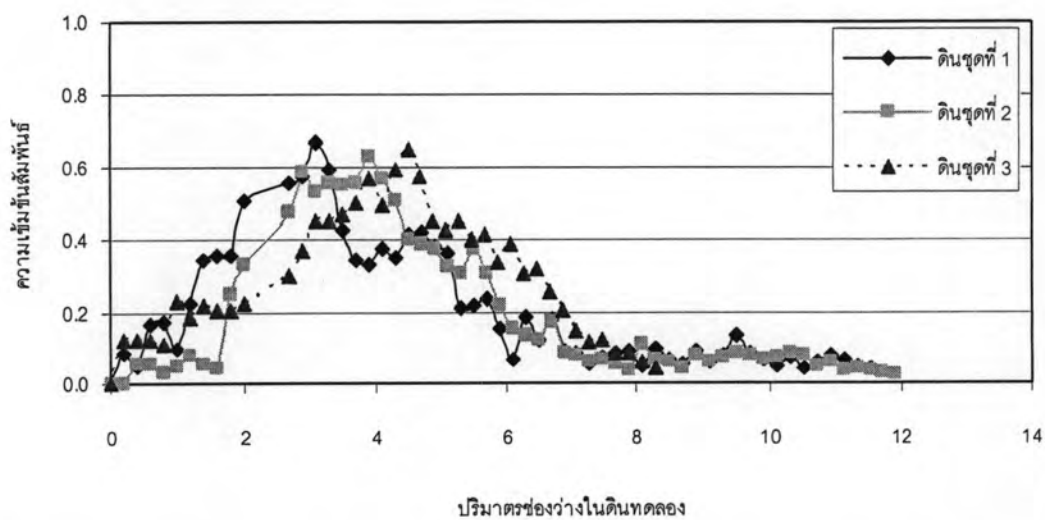
รูปที่ 4-30 ความเข้มข้นของสารเบนซีนในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



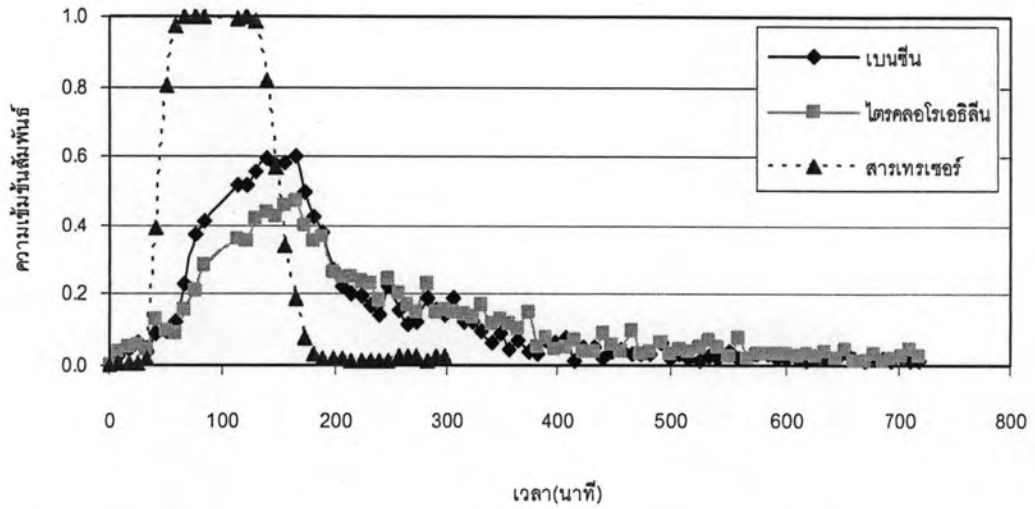
รูปที่ 4-31 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเบนซีนที่ปริมาณช่องว่างในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



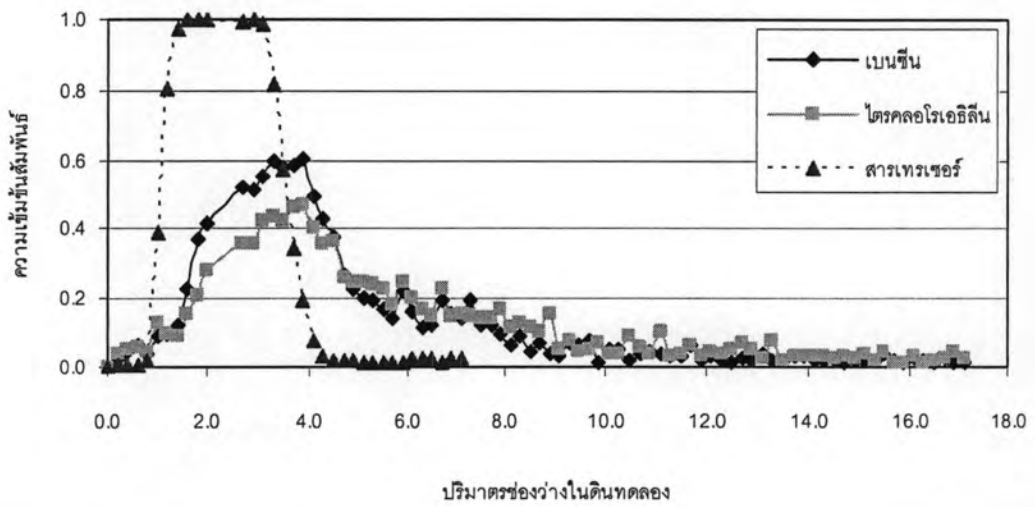
รูปที่ 4-32 ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



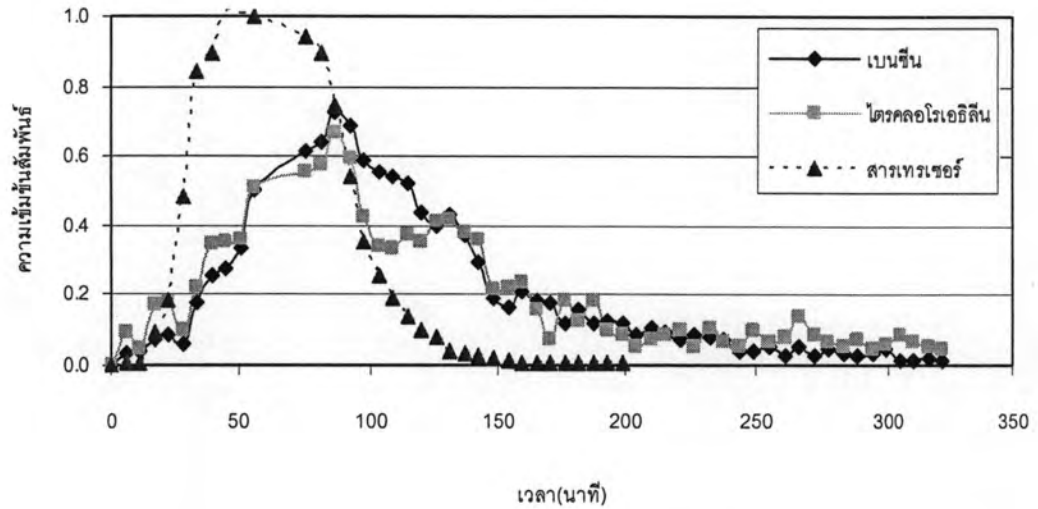
รูปที่ 4-33 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



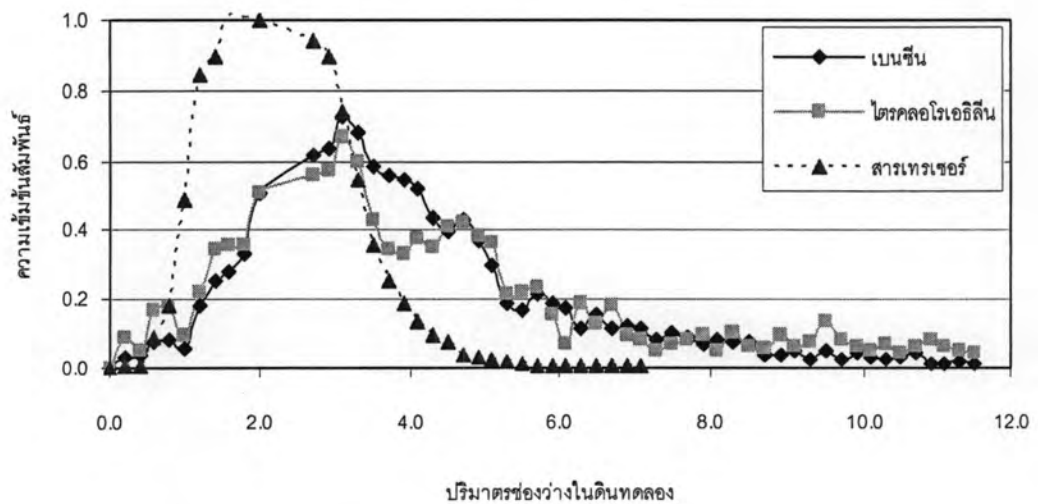
รูปที่ 4-34 เส้นโค้งแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



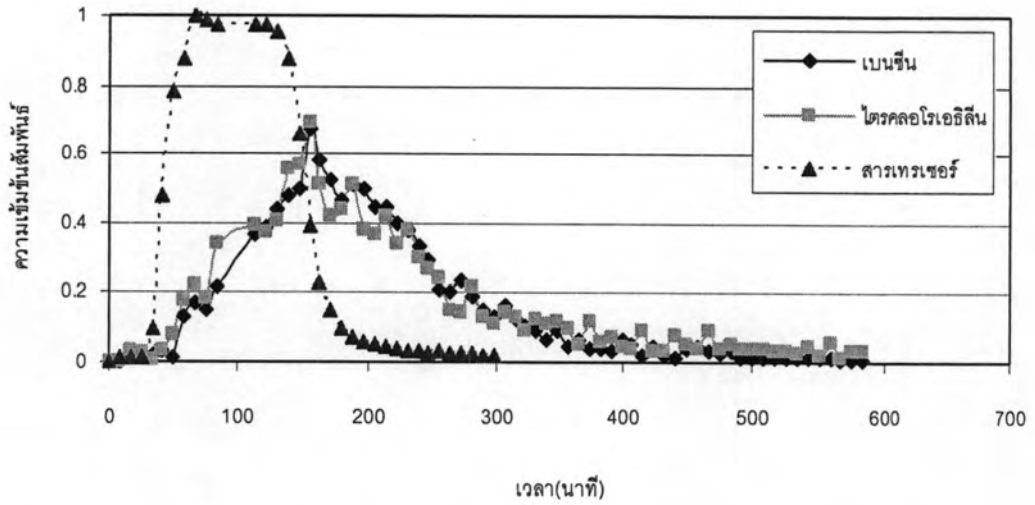
รูปที่ 4-35 เส้นโค้งแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



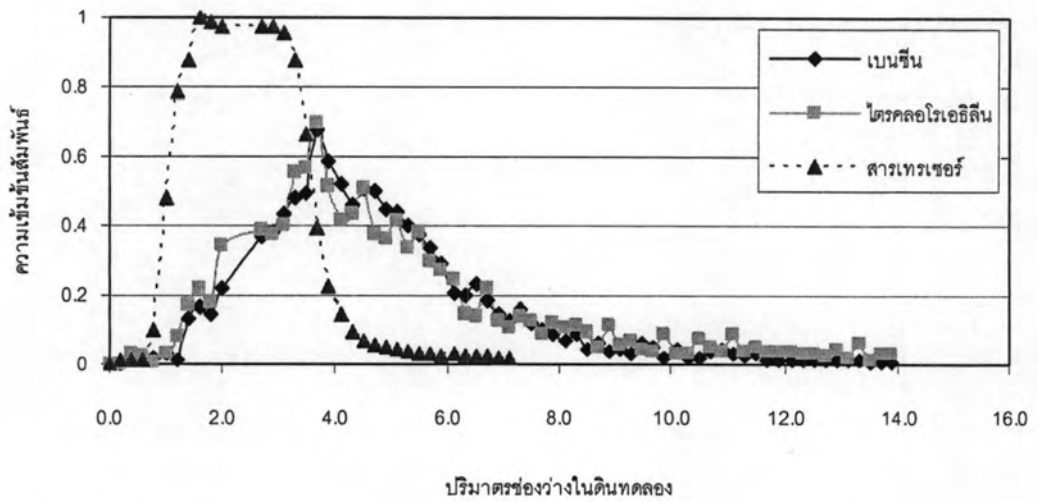
รูปที่ 4-36 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



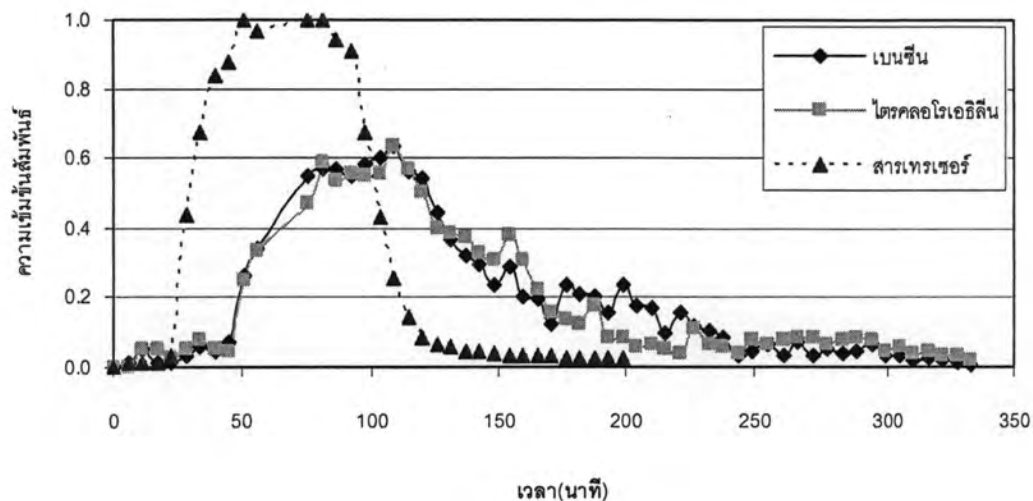
รูปที่ 4-37 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



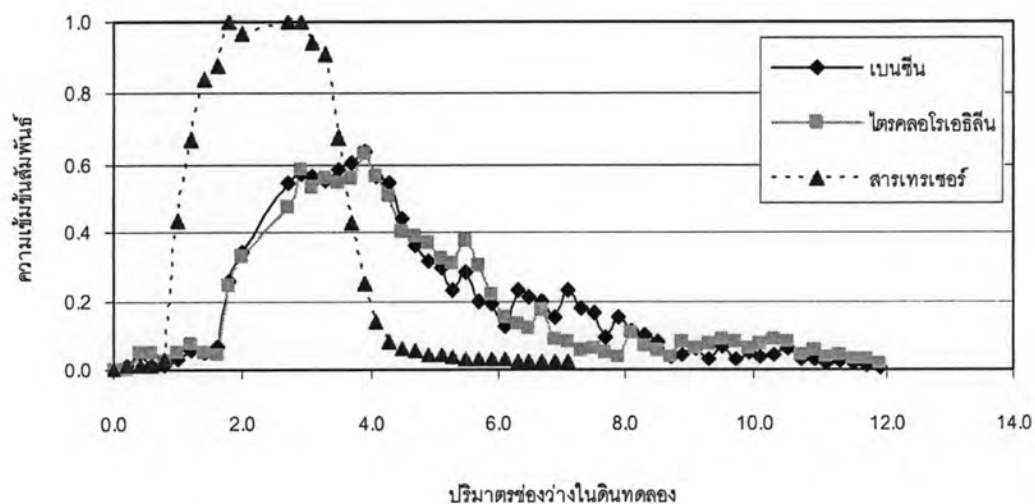
รูปที่ 4-38 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



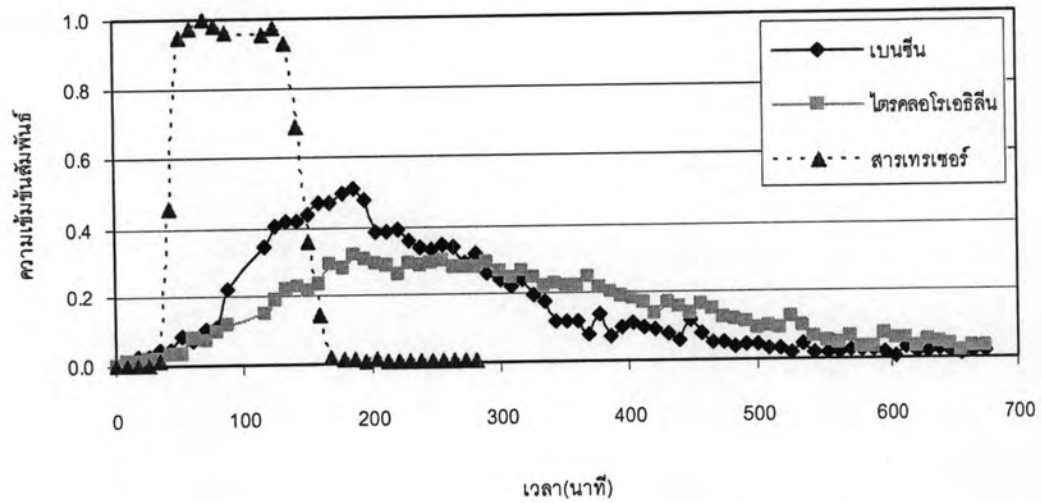
รูปที่ 4-39 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



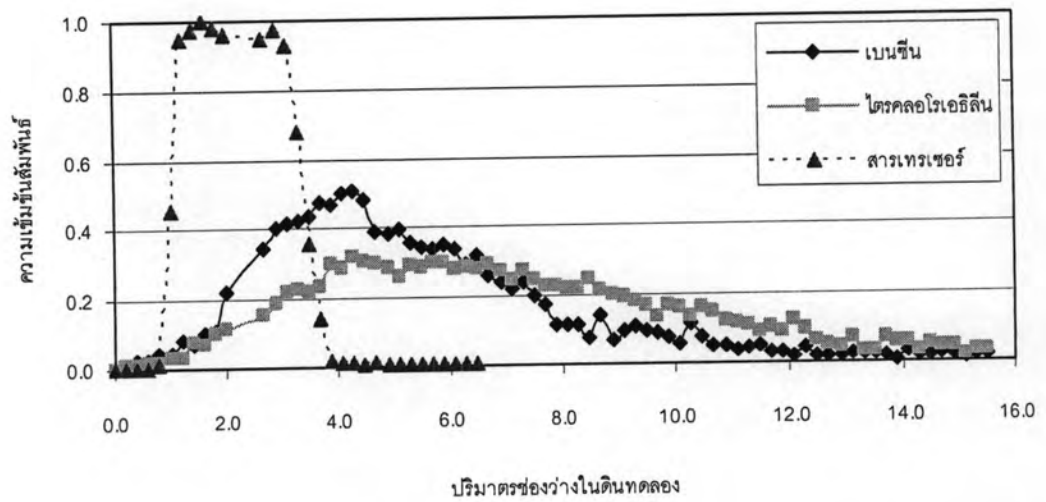
รูปที่ 4-40 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



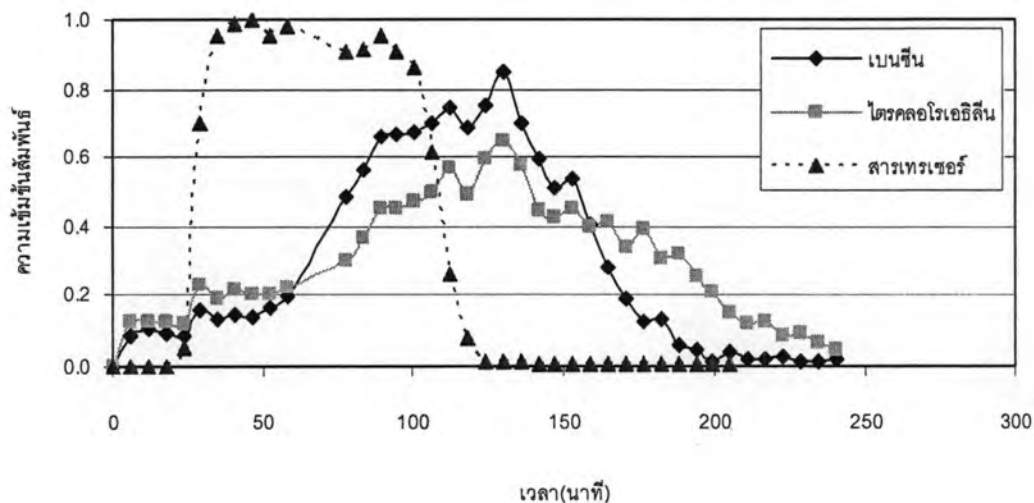
รูปที่ 4-41 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



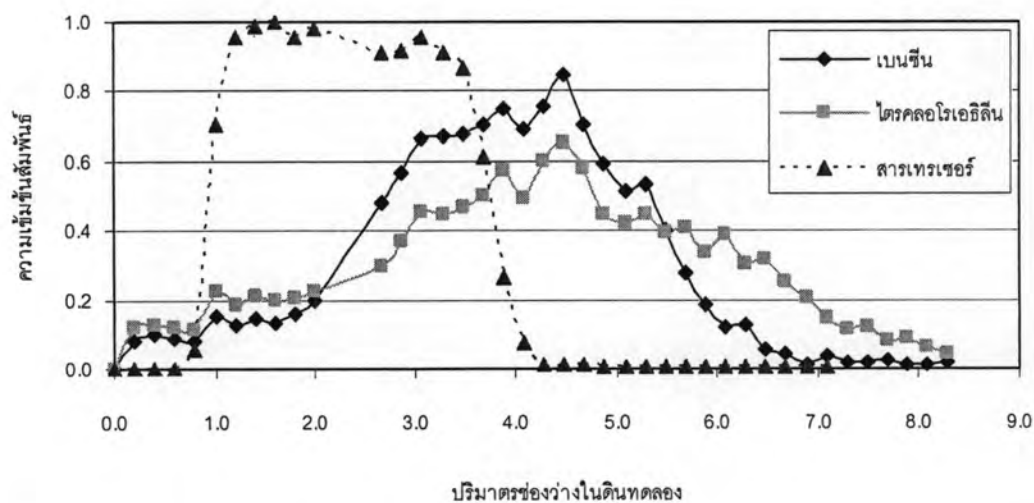
รูปที่ 4-42 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-43 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-44 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-45 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4-4 ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางและความเข้มข้นเฉลี่ยก่อนเข้าคอลัมน์ของสารเบนซีน และไตรคลอโรเอธิลีนในชุดการทดลอง

ดิน ทดลอง	อัตราการไหล	สารละลายเบนซีน		สารละลายไตรคลอโรเอธิลีน	
		ความเข้มข้นเฉลี่ยของ สารในชุดการทดลอง (C ₀)	เวลาเฉลี่ยใน การเดินทาง ทางผานดิน ทดลอง	ความเข้มข้นเฉลี่ยของ สารในชุดการทดลอง (C ₀)	เวลาเฉลี่ยใน การเดินทาง ทางผานดิน ทดลอง
ชุดที่ 1	40 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง	502 มิลลิกรัมต่อลิตร	200.6 นาที	473 มิลลิกรัมต่อลิตร	233.7 นาที
	60 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง	498 มิลลิกรัมต่อลิตร	111.3 นาที	445 มิลลิกรัมต่อลิตร	115.9 นาที
ชุดที่ 2	40 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง	523 มิลลิกรัมต่อลิตร	119.1 นาที	505 มิลลิกรัมต่อลิตร	206.9 นาที
	60 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง	473 มิลลิกรัมต่อลิตร	126.2 นาที	454 มิลลิกรัมต่อลิตร	127.6 นาที
ชุดที่ 3	40 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง	502 มิลลิกรัมต่อลิตร	235.1 นาที	445 มิลลิกรัมต่อลิตร	298.9 นาที
	60 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง	523 มิลลิกรัมต่อลิตร	110.7 นาที	447 มิลลิกรัมต่อลิตร	121.1 นาที

เมื่อนำค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารเพอร์คลอโรเอธิลีนและเบนซีนมาคำนวณหาค่าตัวประกอบความหน่วง ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ที่บอกถึงการหน่วงการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่เป็นผลจากกระบวนการดูดซับ ระหว่างโมเลกุลสารปนเปื้อนกับตัวกลางรูพรุน ดังแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของสารละลายเบนซีนมีค่า 1.97, 1.90, และ 2.40 สำหรับดินชุดที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ สำหรับสารไตรคลอโรเอธิลีนพบค่าตัวประกอบความหน่วงมีค่าเท่ากับ 2.30, 1.98, และ 3.06 สำหรับดินชุดที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วงที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ของสารเบนซีนมีค่าน้อยกว่าสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนในดินชนิดที่ 1-3 ที่ทดสอบ นอกจากนี้ค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจากการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีน เท่ากับ 1.60 (Da Silva and Alvarez, 2002) และ 2.50 สำหรับ ไตรคลอโรเอธิลีน (Davis 2003))

อัตราการไหลของน้ำในระบบมีผลต่อค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนด้วย โดยที่อัตราการไหลต่ำจะทำให้ค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีน

ดินและเบนซีนสูงกว่าเมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำในระบบสูงขึ้นจะส่งผลให้ตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเกิดจากอัตราการไหลที่สูงของน้ำในระบบส่งผลให้เกิดภาวะไม่สมดุลทางเคมี (UTCHEM V.9.0 (2000)) ระหว่างเฟสต่างๆเมื่อสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางรูพรุนนั้นๆ ในขณะที่เมื่ออัตราการไหลต่ำจะส่งเสริมให้เกิดภาวะสมดุลระหว่างเฟสสารเคมี-น้ำ-ตัวกลางรูพรุนได้มากกว่า สรุปได้ว่าการศึกษจากงานวิจัยนี้พบว่าที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางเคมีระหว่างเฟสของสารปนเปื้อน(สารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีน)-น้ำ-ตัวกลางรูพรุน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของระบบที่ดำเนินการทดสอบ เมื่อเปลี่ยนชนิดของตัวกลางรูพรุนหรือชนิดของสารปนเปื้อนจะส่งผลให้ค่าอัตราการไหลที่ก่อให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางเคมีนี้เปลี่ยนแปลงไปด้วย

เมื่อพิจารณาจากขนาดคละของดินแต่ละชุด (สถาพร, 1998) และค่าตัวประกอบความหน่วงพบว่าจากค่าตัวประกอบความหน่วงของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากมีกรวดผสมอยู่ในตัวกลางรูพรุนมากกว่าดินชุดอื่นที่ดำเนินการทดสอบ โดยมีกรวดผสมอยู่ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 3-1 และ รูปที่ 3-2) ในขณะที่ค่าตัวประกอบความหน่วงของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินชนิดที่ 1 มีค่าสูงกว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนที่ได้จากดินชนิดที่ 2 เนื่องจากดินชนิดที่ 1 มีกรวดผสมอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าตัวประกอบความหน่วงของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองในดินชนิดที่ 3 มีค่ามากที่สุดเนื่องจากไม่มีกรวดผสมอยู่ในตัวกลางรูพรุนชนิดที่ 3 เลย

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างสารปนเปื้อนกับตัวกลางรูพรุนและค่าตัวประกอบความหน่วงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของตัวกลางรูพรุน กล่าวคือหากตัวกลางรูพรุนมีองค์ประกอบของดินตะกอนมากจะส่งผลให้การดูดซับของสารปนเปื้อนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย (ในกรณีพิจารณาแต่ขนาดคละเพียงอย่างเดียว ไม่ได้วิเคราะห์ถึงอินทรีย์สารในตัวกลาง)

ตารางที่ 4-5 ค่าตัวประกอบความหน่วงของดินทดลองในแต่ละชุด

ดินทดลอง	อัตราการไหล	สารเบนซีน		สารไตรคลอโรเอธิลีน	
		ค่าตัวประกอบความหน่วง	ค่าตัวประกอบความหน่วง ± 16 เปอร์เซ็นต์	ค่าตัวประกอบความหน่วง	ค่าตัวประกอบความหน่วง ± 16 เปอร์เซ็นต์
ชุดที่ 1	40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1.97	1.43 - 2.73	2.30	1.66 - 3.18
	60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1.72	1.24 - 2.38	1.79	1.30 - 2.47
ชุดที่ 2	40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1.90	1.41 - 2.63	1.98	1.43 - 2.73
	60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1.78	1.29 - 2.46	1.80	1.30 - 2.48
ชุดที่ 3	40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	2.40	1.74 - 3.32	3.06	2.24 - 4.20
	60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	1.60	1.16 - 2.16	1.75	1.27 - 2.42

4.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจากแบบจำลองกายภาพโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญทางชลศาสตร์ด้วยการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แบ่งออกเป็นสองย่อยได้ 2 ส่วนคือ 1. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM 2. ผลการจำลองการเคลื่อนที่ตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM

จากหัวข้อ 4.1.2.2 สามารถคำนวณค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนและค่าตัวประกอบความหน่วงจากผลการศึกษาในแบบจำลองกายภาพได้แต่ค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวอาจมีความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากกระบวนการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องยูวี-วิทิเบิล เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอยู่ในช่วงประมาณ 16

เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะดำเนินการคำนวณค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน โดยการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสารทั้งสองชนิดในตัวกลางรูพรุนชนิดที่ 1-3 โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM และทำการปรับเส้นโค้ง (Fit Curve) โดยวิธีนอนลิเนียร์รีเกรดชัน (Nonlinear Regression Method) เพื่อคำนวณหาค่าตัวประกอบความหน่วงและการแพร่ ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนในตัวกลางรูพรุนชนิดที่ 1-3 ผลการศึกษาแสดงดังตาราง 4-5 และ 4-6

4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM

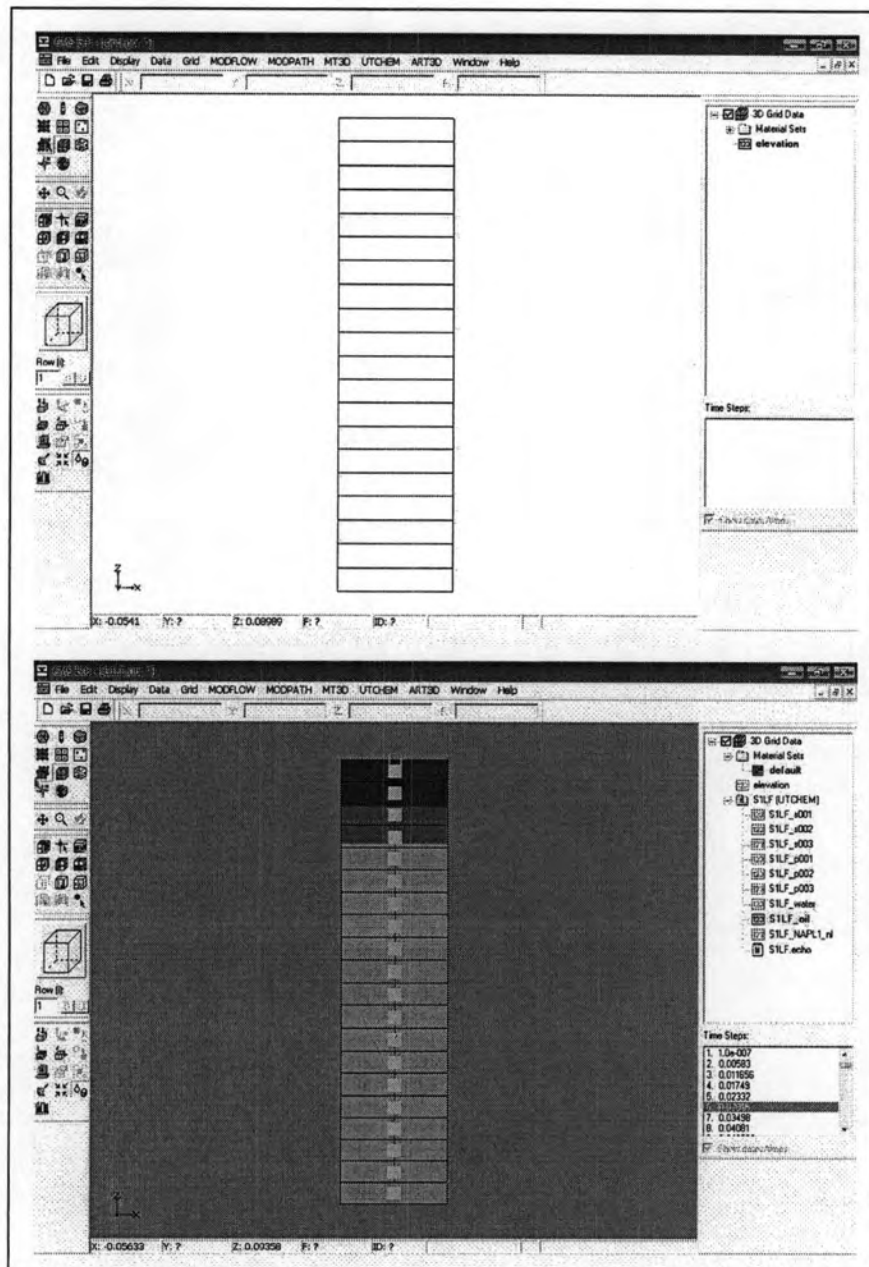
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจากแบบจำลองกายภาพโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ 1. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองจากแบบจำลองกายภาพ 2. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากศึกษาในอดีตที่ผ่านมาและ 3. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองจากแบบจำลองกายภาพ ได้แก่ ค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ค่าความพรุนได้จากการคำนวณจากน้ำหนักดินแลน้ำในการบรรจุดินในคอลัมน์ในแต่ละชุดการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้คำนวณจากการทดสอบด้วยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยนในแต่ละชุดการทดลอง

2. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ, ค่าความหนืดและความสามารถในการละลายน้ำซึ่งอ้างอิงมาจาก Scott and James (1991) และ Newell and Acree (1990)

3. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM ได้แก่ ค่าตัวประกอบความหน่วงและการแพร่

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนแสดงดังตารางที่ 4-6 ลักษณะกริดเซลล์ของการจำลองแสดงดังรูปที่ 4-46



รูปที่ 4-46 กริดเซลล์แบบจำลองกายภาพ

ตารางที่ 4-6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ดินทดลอง	อัตราการไหล	ส.ป.ส.ความซึมผ่านได้* (มิลิดาร์ซี)	ความพรุน*	ความหนืด ** (CP)		ความตึงจำเพาะ** (ก./ซม.^3)		ความสามารถในการ ละลายน้ำ ** (มก./ล.)		ความเข้มข้นเฉลี่ยก่อน เข้าคอลัมน์* (มก./ล)		ค่าตัวประกอบความหน่วง***		การแพร่*** (ม.)	
				Benzene	TCE	Benzene	TCE	Benzene	TCE	Benzene	TCE	Benzene	TCE	Benzene	TCE
ชุดที่ 1	40 มล./ชม.	1.73	0.55	0.64	0.57	0.87	1.46	1780	1100	502	473.0	1.63	1.89	4.10	3.40
	60 มล./ชม.	1.59	0.54	0.64	0.57	0.87	1.46	1780	1100	498	445	1.32	1.38	4.30	3.90
ชุดที่ 2	40 มล./ชม.	5.5	0.56	0.64	0.57	0.87	1.46	1780	1100	523	505	1.50	1.54	2.70	2.60
	60 มล./ชม.	5.4	0.56	0.64	0.57	0.87	1.46	1780	1100	473	454	1.35	1.38	3.00	2.90
ชุดที่ 3	40 มล./ชม.	2.77	0.58	0.64	0.57	0.87	1.46	1780	1100	502	445	1.80	2.34	3.50	3.50
	60 มล./ชม.	2.84	0.58	0.64	0.57	0.87	1.46	1780	1100	523	447	1.29	1.41	3.50	2.60

*การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

** Scott and James (1991) และ Newell and Acree (1990)

***การคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM

4.2.2 ผลการจำลองการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนด้วย แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM

1. ผลการจำลองในดินทดลองชุดที่ 1

การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลอิมพัลส์ด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่ได้จากการทดลองกล่าวคือความเข้มข้นและขาลงค่าใกล้เคียงกันเมื่อถึงความเข้มข้นสูงสุดผลการจำลองจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าผลการทดลอง ความเข้มข้นขาลงก็ยังคงสอดคล้องกันแต่ความเข้มข้นที่ได้จากการตรวจวัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงกว่าจากการจำลอง ดังรูปที่ 4-47 และ 4-48 ค่าการแพร่และตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนจากการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีค่าเท่ากับ 4.1 เมตร และ 1.63 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าเท่ากับ 3.4 เมตร และ 1.89 ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการจำลองแสดงความเข้มข้นสารปนเปื้อนเทียบกับเวลาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM ยังคงสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกล่าวคือความเข้มข้นและขาลงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM ความเข้มข้นมีแนวโน้มต่ำกว่าผลจากการทดลอง ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารปนเปื้อนดังแสดงในรูปที่ 4-49 และ 4-50 ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนจากการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีค่าเท่ากับ 4.3 เมตร และ 1.32 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าเท่ากับ 3.9 เมตร และ 1.38 ตามลำดับ

2. ผลการจำลองในดินทดลองชุดที่ 2

การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลอิมพัลส์ด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่ได้จากการทดลองกล่าวคือความเข้มข้นและขาลงค่าใกล้เคียงกัน เมื่อถึงความเข้มข้นสูงสุดผลการจำลองจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าผลการทดลอง ความเข้มข้นขาลงก็ยังคงสอดคล้องกันแต่ความเข้มข้นที่ได้จากการตรวจวัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงกว่าจากการจำลอง ดังรูปที่ 4-51 และ 4-52 ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนจากการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีค่าเท่ากับ 2.7 เมตร และ 1.50 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าเท่ากับ 2.6 เมตร และ 1.54 ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการจำลองเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสารปนเปื้อนเทียบกับเวลาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM ยังคงสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกล่าวคือความเข้มข้นและขาลงมีค่าใกล้เคียงกันแต่เป็นที่น่าสังเกตว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีความเข้มข้นมีแนวโน้มต่ำกว่าผลจากการทดลอง ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารปนเปื้อนดังแสดงในรูปที่ 4-53 และ 4-54 ค่า การแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนจากการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีค่าเท่ากับ 3.0 เมตร และ 1.35 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าเท่ากับ 2.9 เมตร และ 1.38 ตามลำดับ

3. ผลการจำลองในดินทดลองชุดที่ 3

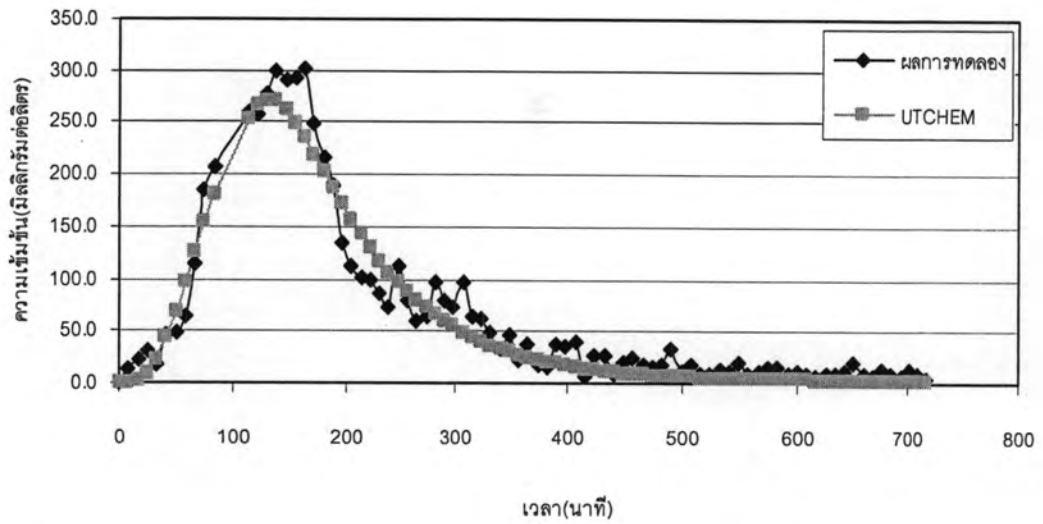
การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลอิมพัลส์ด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM พบว่าผลการจำลองสารเบนซีนสอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่ได้จากการทดลองแต่ผลการจำลองสารไตรคลอโรเอธิลีนไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่ได้จากการทดลองกล่าวคือความเข้มข้นและขาลงของสารเบนซีนมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อถึงความเข้มข้นสูงสุดผลการจำลองจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าผลจากการทดลอง ความเข้มข้นก็ยังคงสอดคล้องกันแต่ความเข้มข้นที่ได้จากการตรวจวัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงกว่าจากการจำลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าสอดคล้องแต่ความเข้มข้นมีค่าไม่สอดคล้องโดยความเข้มข้นจากการตรวจวัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงกว่าการจำลอง ดังรูปที่ 4-55 และ 4-56 ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนจากการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีค่าเท่ากับ 3.5 เมตร และ 1.80 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าเท่ากับ 3.5 เมตร และ 2.34 ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการจำลองแสดงความเข้มข้นสารปนเปื้อนเทียบกับเวลาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM ไม่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกล่าวคือ ความเข้มข้นและขาลงจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM ความเข้มข้นมีแนวโน้มต่ำกว่าผลการตรวจวัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 4-57 และ 4-58 ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงของสารเบนซีนจากการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM มีค่าเท่ากับ 4.3 เมตร และ 1.32 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการแพร่และ ค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าเท่ากับ 3.9 เมตร และ 1.38 ตามลำดับ

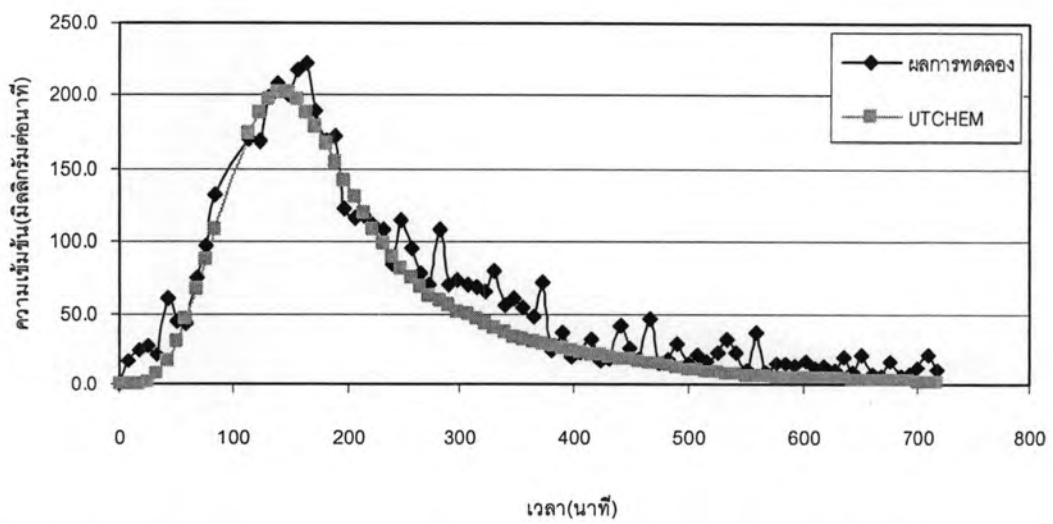
ดินทดลองชุดที่ 3 เมื่อพิจารณาตามขนาดคละพบว่าเป็นดินที่เป็นดินตะกอนมากที่สุดไม่มีกรวดอยู่ในตัวกลาง การจำลองผลการทดลองในดินนี้มีการจำลองที่ไม่สอดคล้องมากที่สุดอาจมี

สาเหตุมาจากส่วนของการคำนวณการดูดซับ (Sorption Module) จากตัวแบบจำลอง UTCHEM กล่าวคือ ดินตะกอนเมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงน้ำไหลผ่านได้ยาก ไม่เหมือนทรายมีน้ำผ่านได้ง่ายกว่าและในดินตะกอนจะมีอินทรีย์สาร (Organic Matter) มากกว่า ทรายดังนั้นการอธิบายการดูดซับสารปนเปื้อนย่อมมีความซับซ้อนมากกว่า จากทฤษฎีการดูดซับ ซึ่งอธิบายได้ 3 ฟังก์ชันคือ ไอโซเทอมเชิงเส้น, ไอโซเทอมของฟรุนดิชและไอโซเทอมของแลงเมียร์ ในการจำลองนี้ใช้ ไอโซเทอมเชิงเส้นซึ่งการใช้ไอโซเทอมเชิงเส้นน่าจะมีความเหมาะสมกับการจำลองกับตัวกลางรุกรานทั่วไป เมื่อตัวกลางรุกรานมีลักษณะเป็นดินตะกอนหรือดินเหนียวอาจจะทำให้จำลองผลได้ไม่ดีนัก

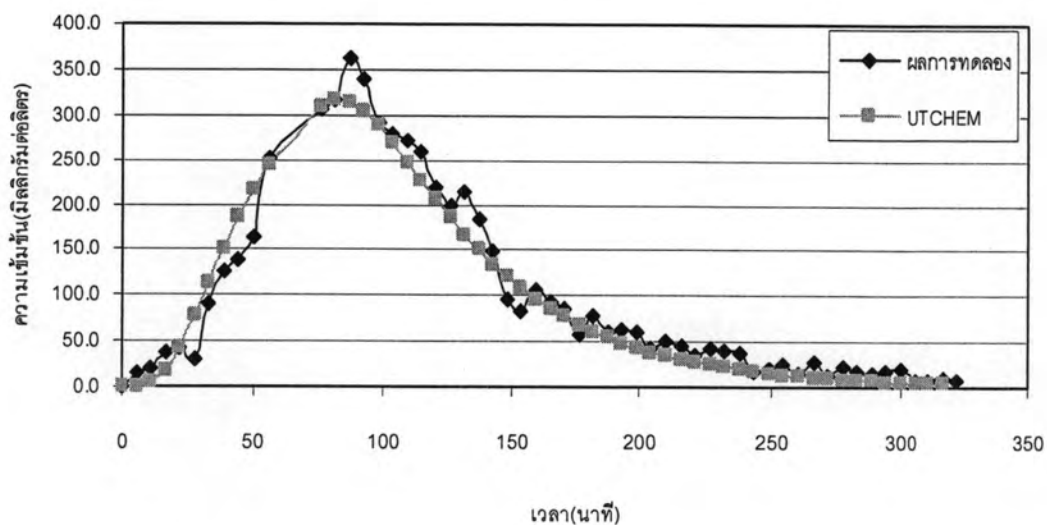
เมื่อพิจารณาค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงที่คำนวณได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังตารางที่ 4-2, 4-5 และ 4-6 จากตัวแบบจำลอง UTCHEM ผลการคำนวณค่าการแพร่พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ค่าการแพร่ของเบนซีนมีค่า 4.9 เมตร (Gray K.,1990) ค่าการแพร่ของไตรคลอโรเอธิลีนมีค่า 5.0 เมตร (Schwartz F. and Zhang H ,1999))



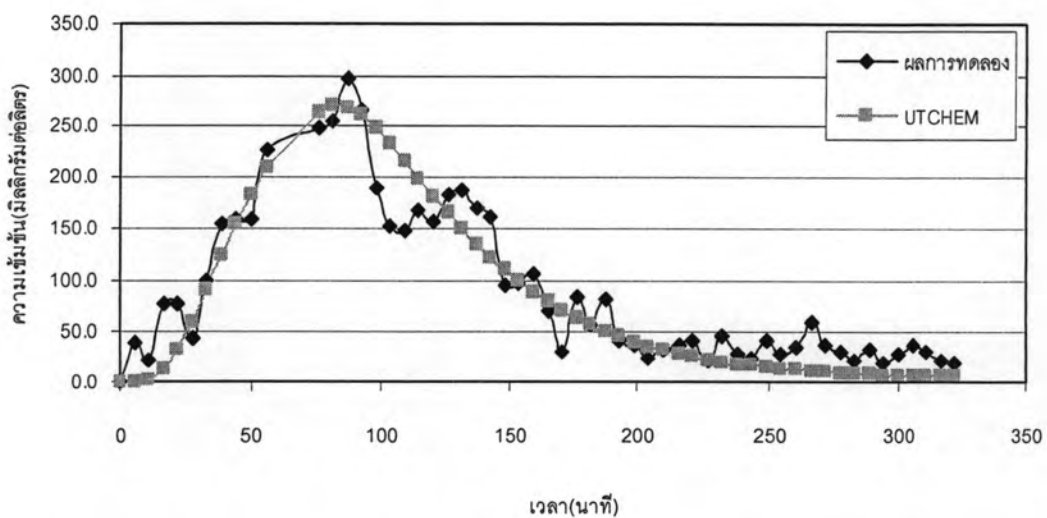
รูปที่ 4-47 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



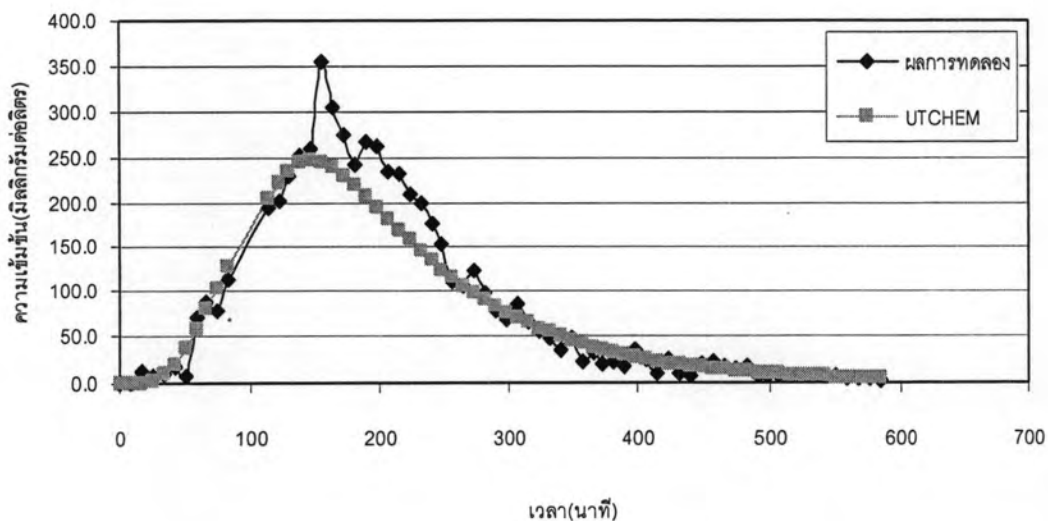
รูปที่ 4-48 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



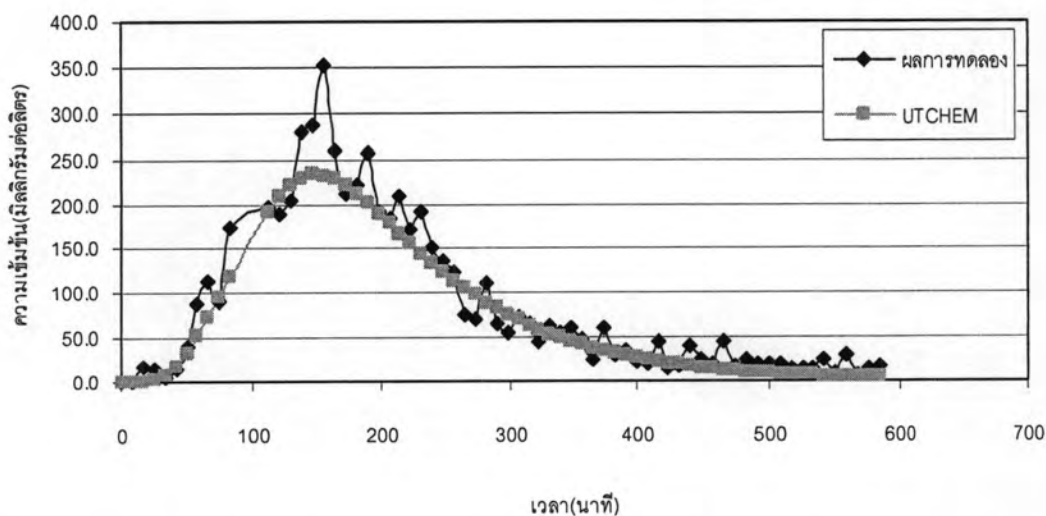
รูปที่ 4-49 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



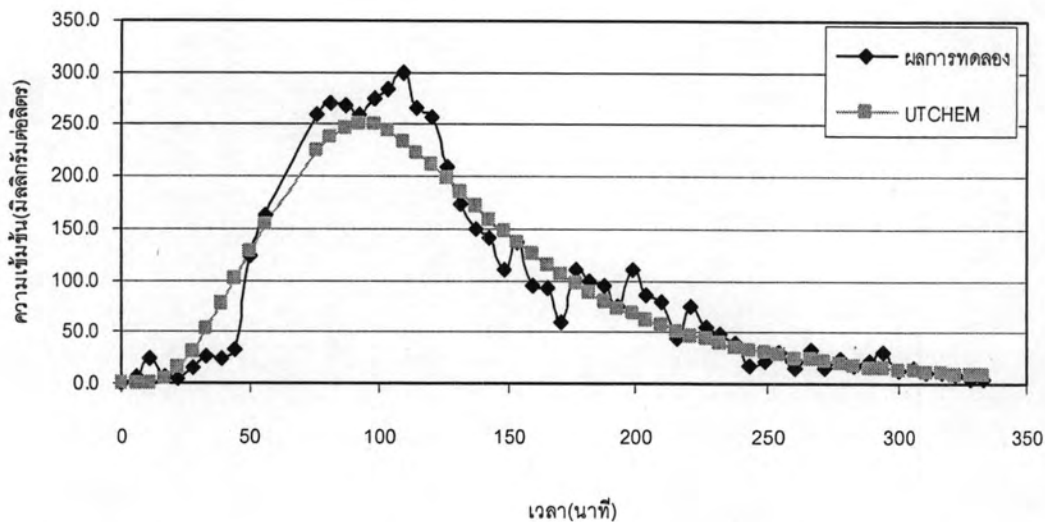
รูปที่ 4-50 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



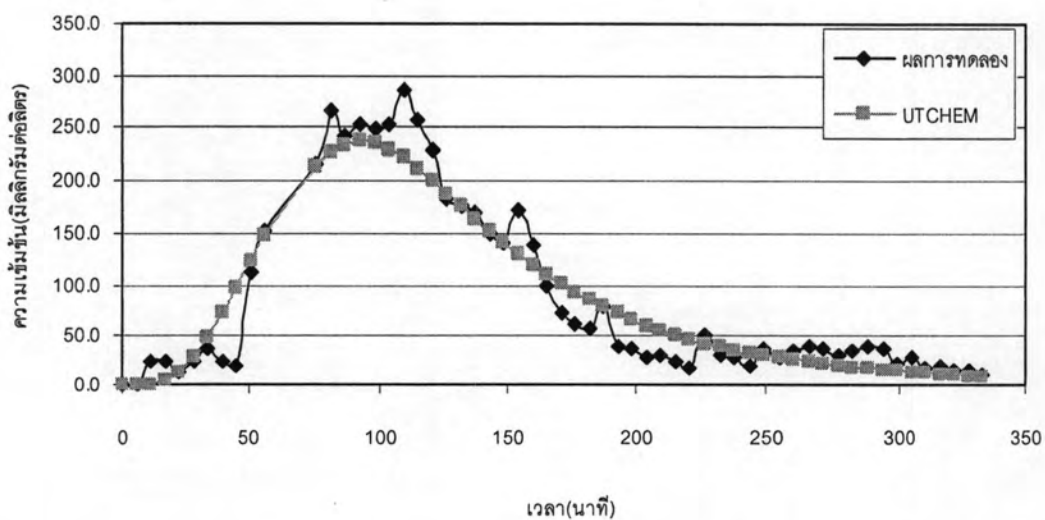
รูปที่ 4-51 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารละลายเบนซีนในดินชนิดที่ 2 ที่อัตราการใช้ 40 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง



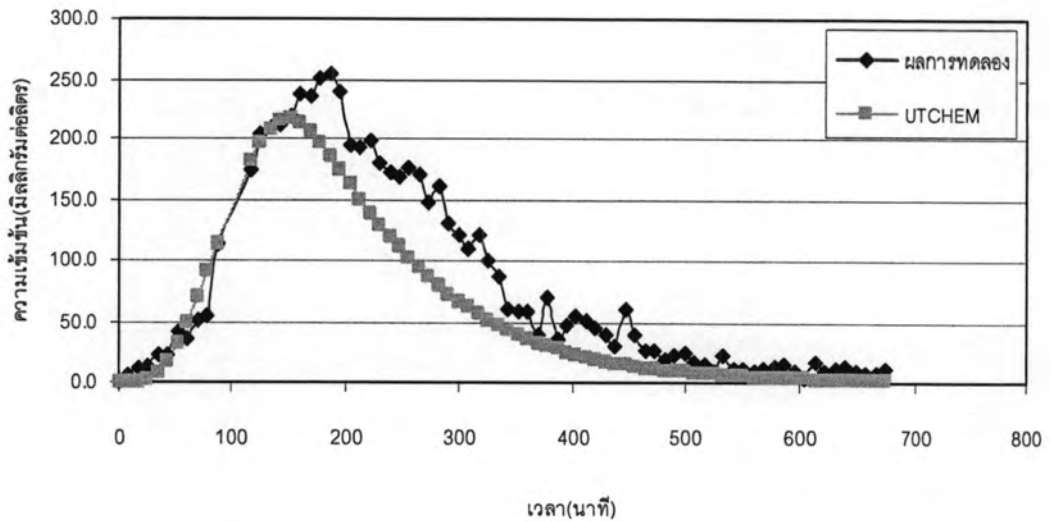
รูปที่ 4-52 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารละลายไดรคลอโรเอธิลินในดินชนิดที่ 2 ที่อัตราการใช้ 40 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง



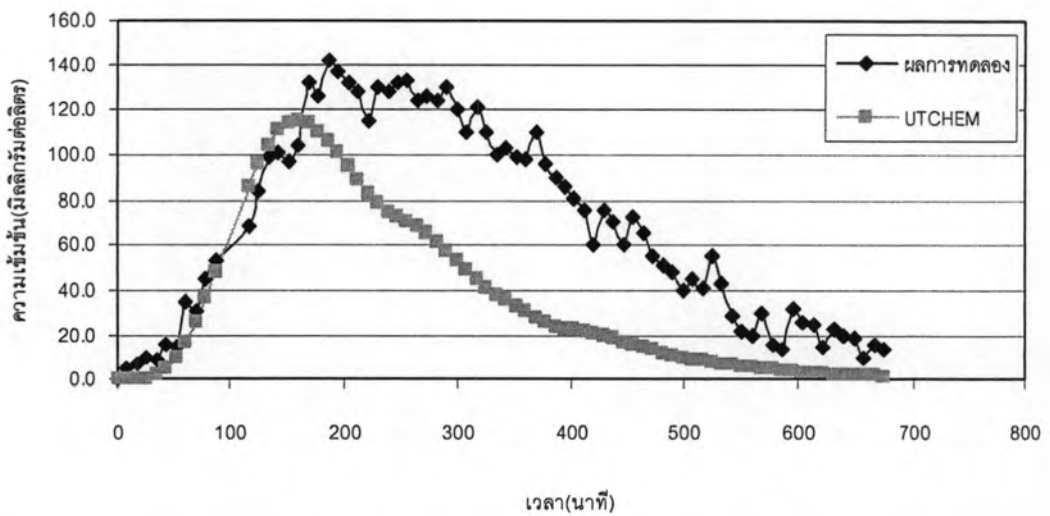
รูปที่ 4-53 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



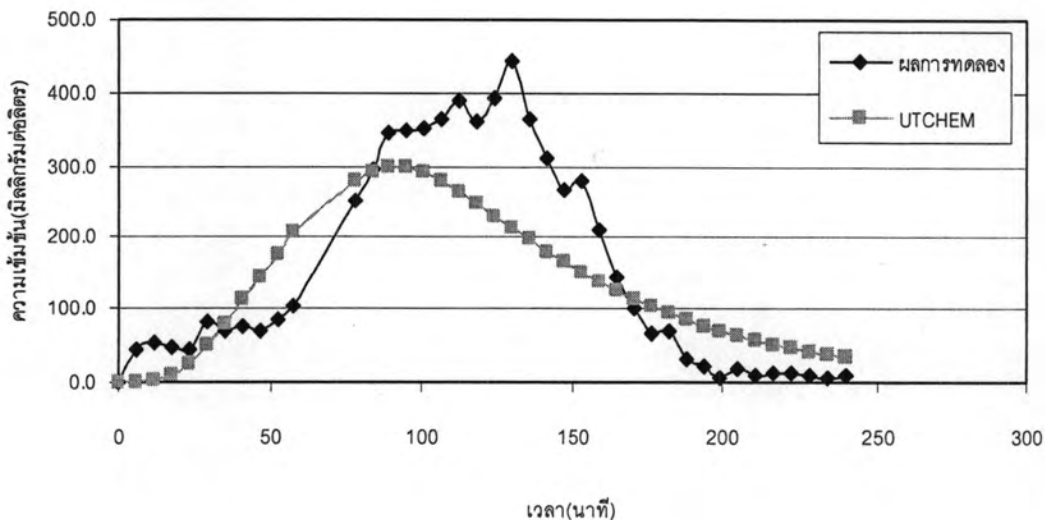
รูปที่ 4-54 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



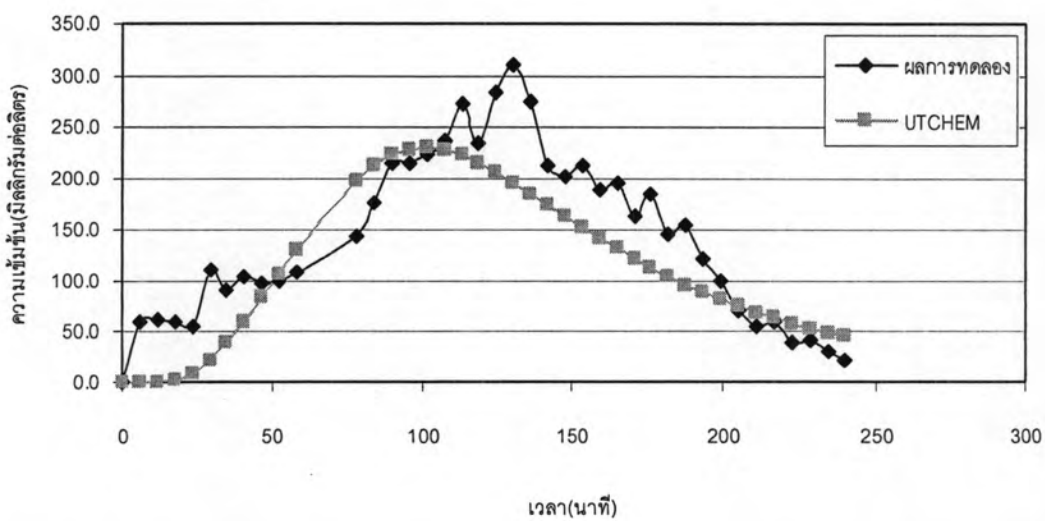
รูปที่ 4-55 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-56 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอทิลีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-57 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-58 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอทิลีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง