

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยนี้ทำการทดลอง 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือการทดลองการดูดซึมสารละลายไตรคลอโรเอเททิลีนและโทลูอินในท่อยางซิลิโคน และการทดลองแยกสารละลายไตรคลอโรเอเททิลีนและสารละลายโทลูอินโดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองดูดซึมสารละลายไตรคลอโรเอเททิลีนและโทลูอิน ในท่อยางซิลิโคน

การวิเคราะห์ผลการทดลองได้พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซึมสารละลายไตรคลอโรเอเททิลีน (TCE) และโทลูอินความเข้มข้น 0-500 พีพีเอ็ม ในชั้นยางซิลิโคน รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ และตัวอย่างการคำนวณแสดงใน ภาคผนวก ข.1

จากการทดลองการดูดซึมสารละลาย TCE และโทลูอินความเข้มข้น 0 50 250 และ 500 พีพีเอ็ม ในท่อยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ค่าประสิทธิภาพการดูดซึมคำนวณดังสมการ 4.1 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซึมสารละลาย TCE และโทลูอินเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของสารละลายและความเข้มข้นสารละลายสูงขึ้น แสดงว่ายางซิลิโคนสามารถดูดซึม TCE และ โทลูอินสูงกว่าน้ำ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสารละลาย 2 ชนิด พบว่าประสิทธิภาพการดูดซึมในยางซิลิโคนของสารละลายโทลูอินสูงกว่า TCE แสดงว่า โทลูอินทำให้เกิดการพองตัวของโพลีเมอร์มากกว่า TCE ซึ่งทำให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลของสายโซ่โพลีเมอร์ขยายใหญ่ขึ้นจึงถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของน้ำมากขึ้น

$$\% \text{ Sorption} = \left(\frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

ความสามารถของการละลายของ TCE และโทลูอินในยางซิลิโคนสามารถแสดงในค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารละลายและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในยางซิลิโคนที่สภาวะสมดุลของแต่ละอุณหภูมิที่ควบคุมเท่ากับ 40 50 60 และ 70 °C โดยที่ความชันของกราฟแต่ละที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ นั้นคือค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดังสมการ 4.2

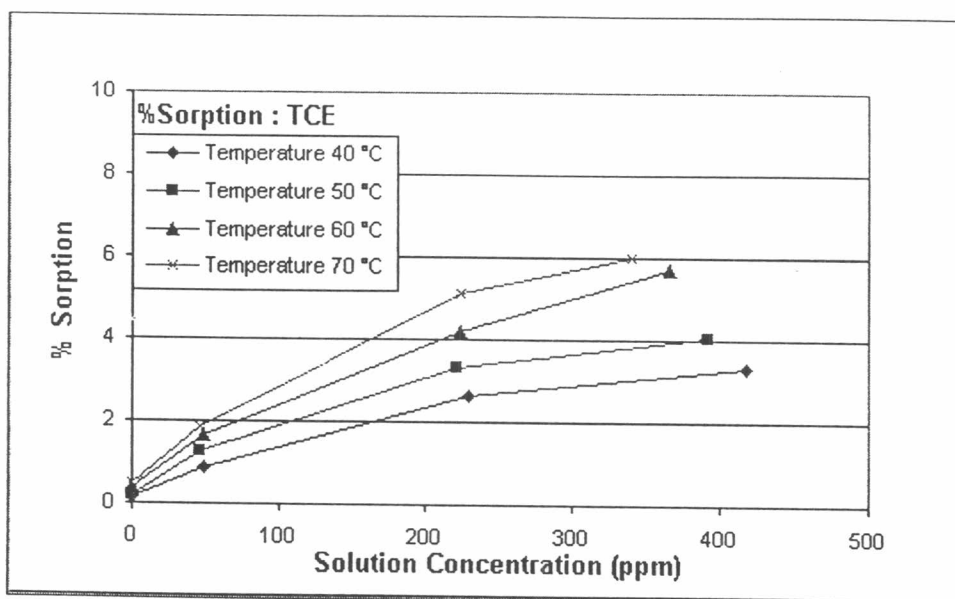
$$K_S = \frac{C_M}{C_L} \quad (4.2)$$

จากผลการทดลองพบว่า K_S ของสารละลาย TCE มีค่าสูงกว่าโทลูอินโดยมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ 100-300 โดยเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิของสารละลาย แต่ผลที่ได้ขัดแย้งกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ (Dutta และ Sikdar ; 1999) ที่กล่าวว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโทลูอินมีค่ามากกว่าเนื่องจากผลของโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโทลูอิน (0.37 Debye) น้อยกว่าไตรคลอโรเอทิลีน (0.80 Debye) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองในครั้งนี้เนื่องจากปริมาณของซินยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดลองการดูดซับมากกว่าและทำการทดลองที่อุณหภูมิของสารละลายสูงกว่า จึงเป็นผลทำให้ยางซิลิโคนขยายตัวและดูดซับน้ำมากขึ้น

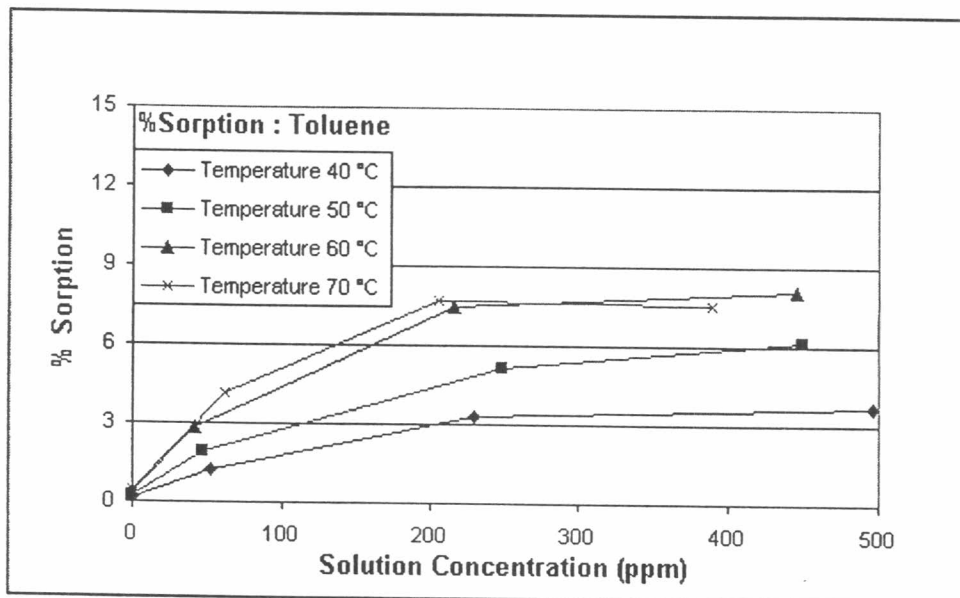
ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย K_S ถูกนิยามเป็นค่าความสามารถของการละลาย (solubility ; S_i) ของสารละลายอินทรีย์ละลายในยางซิลิโคนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถของการละลายกับอุณหภูมิของสารละลาย ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของสารอินทรีย์ในยางซิลิโคนสามารถอธิบายได้โดยค่าพลังงานการละลาย (ΔH_S) ซึ่งแสดงดังสมการ 2.46

$$S_i = S_o \exp(-\Delta H_S/RT) \quad (2.46)$$

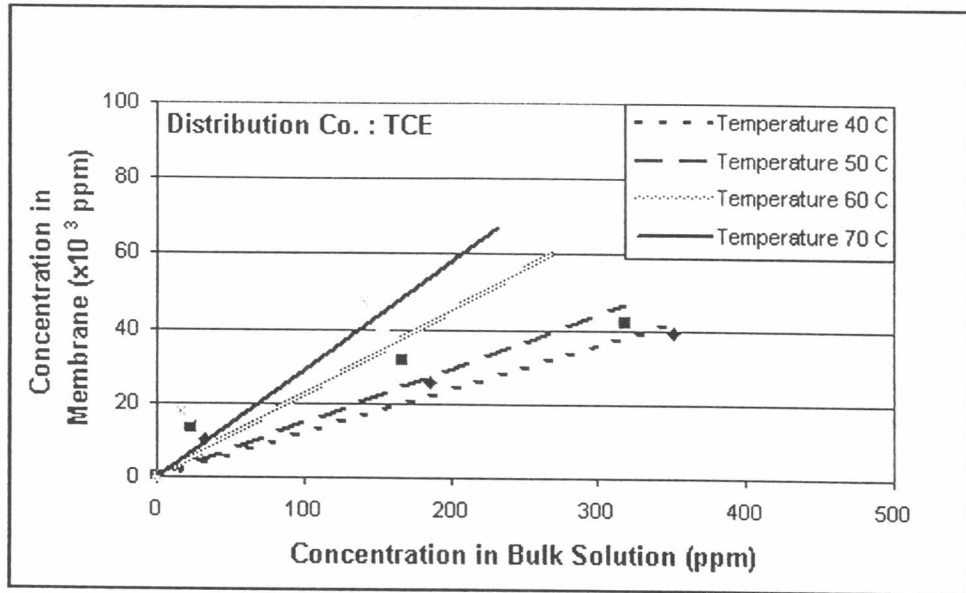
รูป 4.6 แสดงผลความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการละลาย ($\ln S_i$) และอุณหภูมิของสารละลาย ($1/T$) ซึ่งสัมพันธ์กับสมการ 2.46 พบว่าค่าพลังงานการละลายของ TCE และโทลูอินมีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 27.66 และ 27.85 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิของสารละลายที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถการละลายของ TCE ในยางซิลิโคนมากกว่าโทลูอินเล็กน้อยเนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยกว่า



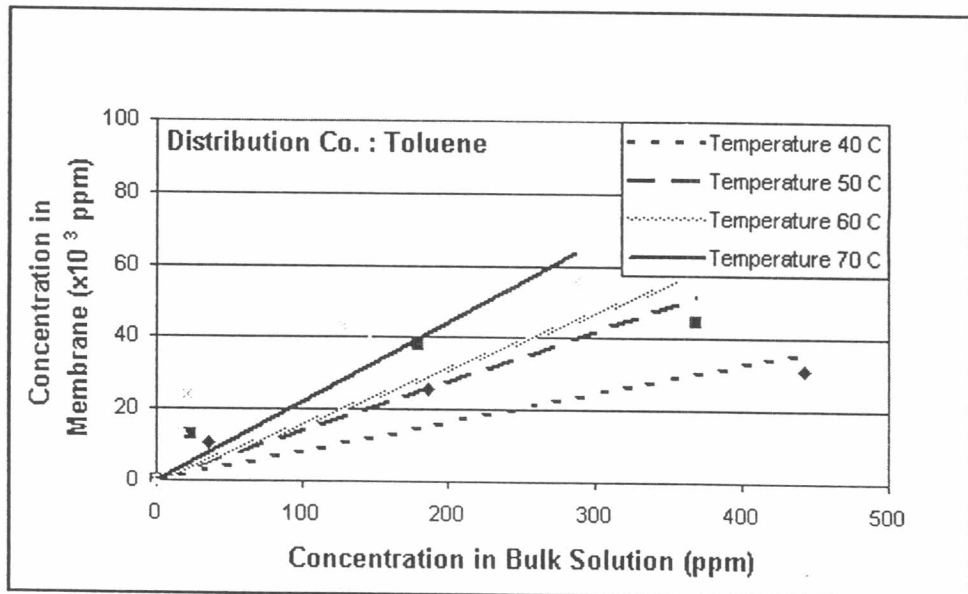
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและประสิทธิภาพการดูดซึมสารละลาย TCE ในยางซิลิโคนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน



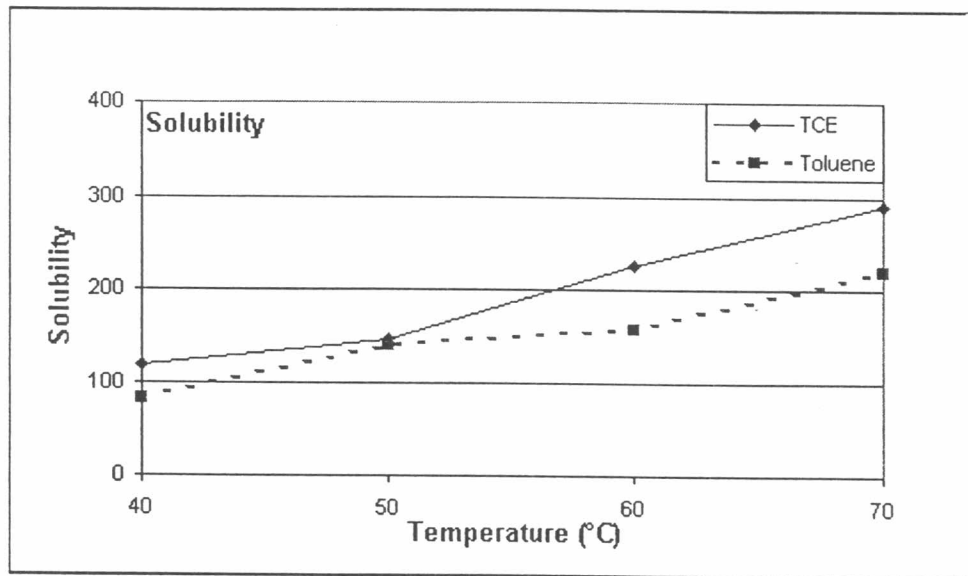
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและประสิทธิภาพการดูดซึมสารละลาย โทลูอีนในยางซิลิโคนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน



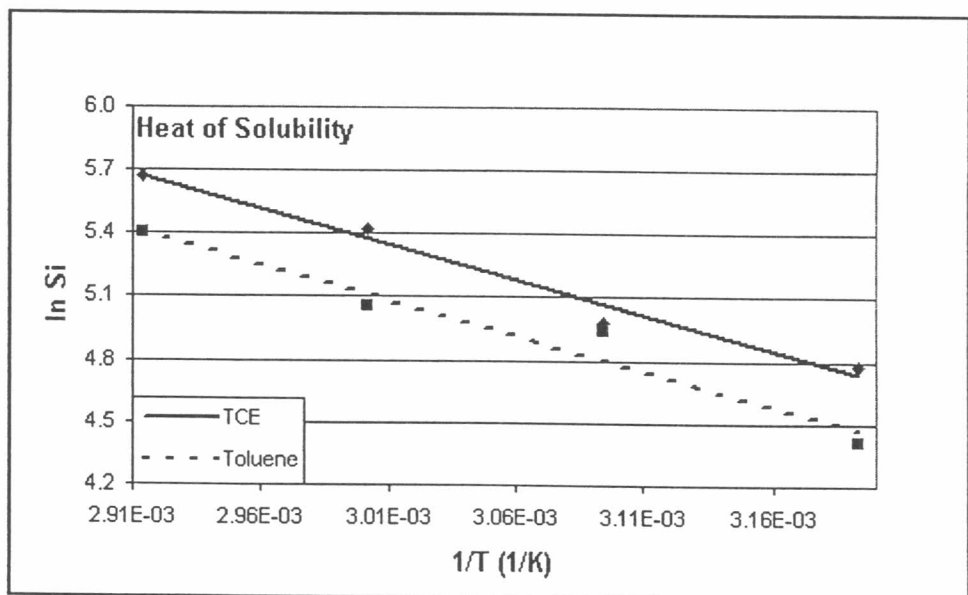
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE ในยางซิลิโคนและในสารละลายอุณหภูมิต่างๆ กัน ที่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ โทลูอีนในยางซิลิโคนและในสารละลายอุณหภูมิต่างๆ กัน ที่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการละลายและอุณหภูมิของ TCE และ โทลูอิน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่า $\ln Si$ และ $1/T$ เพื่อกำหนดค่าพลังงานการละลาย (ΔH_s) จากสมการ 4.2 ของ TCE และ โทลูอินในยางซิลิโคน

4.2 ผลการทดลองแยกสารละลายไทรโคลอโรเอทรีลีนและโทลูอินด้วยชุดทดลองเพอร์เวเพอร์เรนซ์

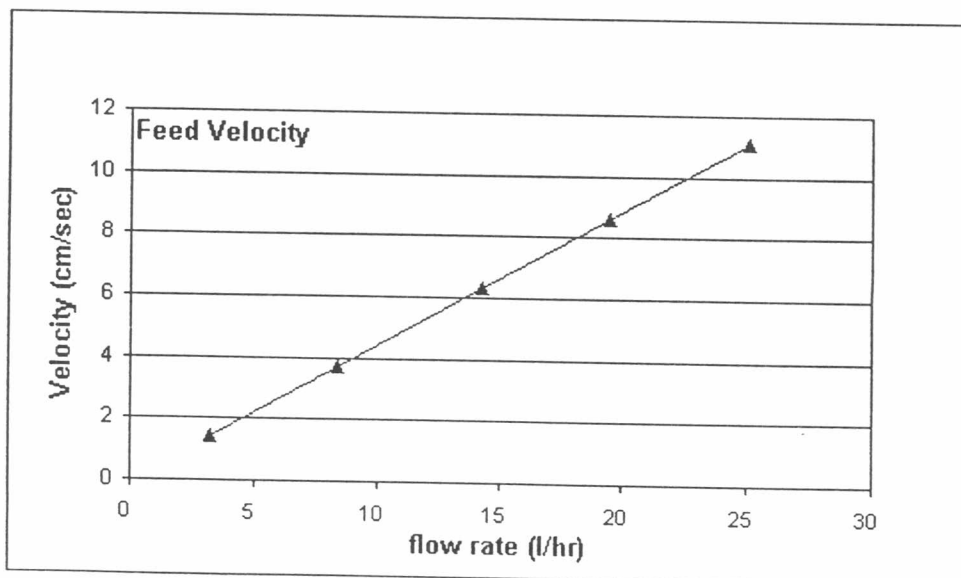
การวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ พิจารณาผลของอุณหภูมิและอัตราไหลของสารป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพและลักษณะจำเพาะ (Process Characteristic) ของกระบวนการเพอร์เวเพอร์เรนซ์ของชุดทดลอง รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ และตัวอย่างการคำนวณแสดงใน ภาคผนวก ข.2

การทดลองเพอร์เวเพอร์เรนซ์นี้เป็นกระบวนการแบบ batch และมีการหมุนเวียนสารป้อน (feed-bleed) ตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ดังนั้นความเข้มข้นของสารป้อนจึงลดลงตามเวลาที่ทำการทดลอง จึงกำหนดความเข้มข้นเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (log mean concentration ; ΔC_{lm}) ของตัวอย่างสารป้อนที่เก็บได้ในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดเป็นความเข้มข้นของสารป้อนเวลานั้น ๆ โดยที่ค่า ΔC_{lm} คำนวณได้ดังนี้

$$\Delta C_{lm} = \frac{C_n - C_{n+1}}{\ln(C_n/C_{n+1})} \quad (4.4)$$

เมื่อ C_n และ C_{n+1} คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารป้อนของตัวอย่างที่ n และ $n+1$ ตามลำดับ

อัตราการไหลของสารป้อนที่เพิ่มขึ้น (3.3-25.1 ลิ./ชม.) นั้นนอกจากจะเพิ่มการหมุนเวียนสารป้อนให้สูงขึ้นแล้วยังมีผลต่อความเร็วของสารป้อนที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นอีกด้วย ซึ่งอยู่ในช่วง 1.4-11.1 ซม./วินาที ดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นในช่วงอัตราการไหลที่ทำการทดลองของสารป้อน

4.2.1 ประสิทธิภาพของการแยกสารละลาย TCE และโทลูอินด้วยชุดทดลองเพอร์เมอเรนซ์

การพิจารณาประสิทธิภาพการแยกของชุดทดลองนั้นได้พิจารณาค่าร้อยละการแยก (% Removal) และฟลักซ์ของเพอร์เมอเรนซ์รวมจากการทดลอง ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งนั้นทำการทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นประมาณ 500 พีพีเอ็ม ค่าร้อยละการแยกคำนวณได้จากสมการ 4.5 ค่าร้อยละการแยกที่ได้จากแต่ละการทดลองของสารละลาย TCE และโทลูอิน แสดงดังรูป 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

$$\% \text{ Removal} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \quad (4.5)$$

เมื่อ C_o และ C_e คือ ความเข้มข้นของสารป้อนเริ่มต้นและความเข้มข้นของสารป้อนเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ 4 ชม. ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าร้อยละการแยกสูงสุดใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 98 และ 97 สำหรับการทดลองกับสารละลาย TCE และโทลูอินตามลำดับ ที่อุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนสูงสุดเท่ากับ 70 °C และ 25.1 ล./ชม.

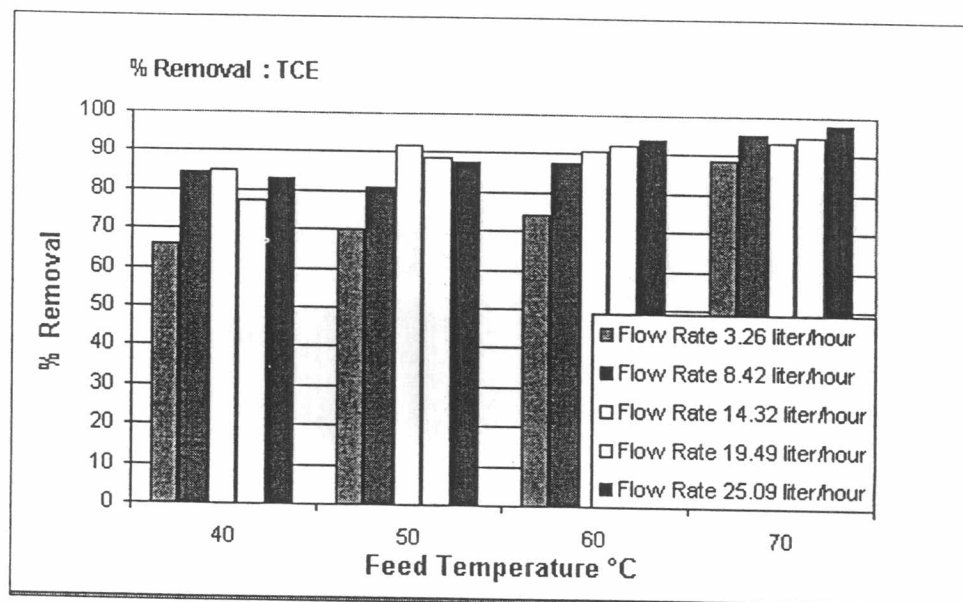
ค่าฟลักซ์ของเพอร์เมอเรนซ์รวม (total permeate flux ; J_T) เป็นผลรวมของฟลักซ์ของสารอินทรีย์และน้ำที่ซึมผ่านเยื่อแผ่นซึ่งทำการพิจารณาตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลอง 4 ชม. สามารถคำนวณได้ดังสมการ 4.6

$$J_T = \frac{W}{A \times t} \quad (4.6)$$

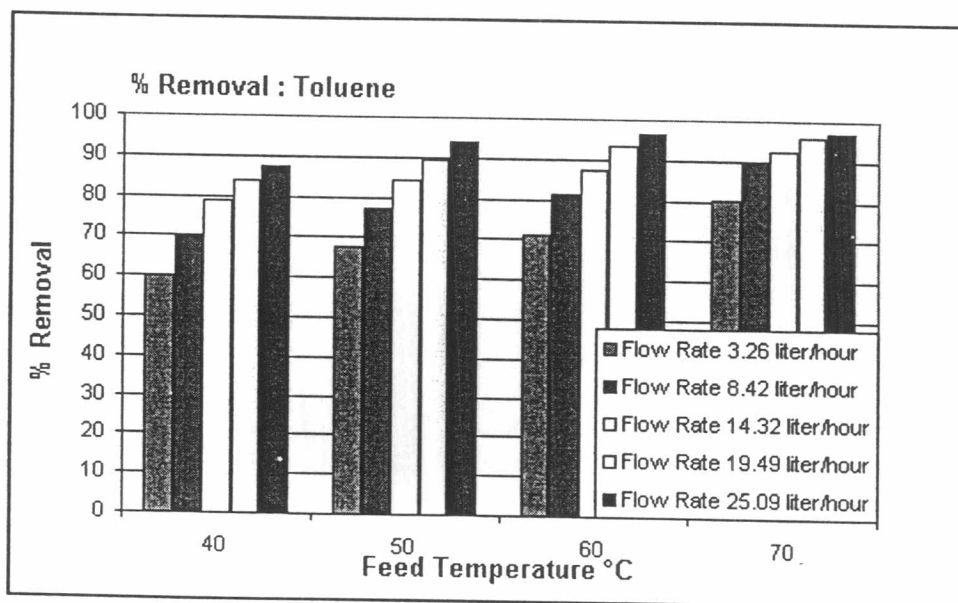
โดย W คือ น้ำหนักของเพอร์เมอเรนซ์
 A คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของเยื่อแผ่น เท่ากับ 377 ตร.ซม
 t คือ เวลาที่ทำการทดลอง 4 ชม.

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงค่าฟลักซ์รวมเฉลี่ยของแต่ละการทดลองของสารละลายทั้งสองชนิด ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจาก 40 - 70°C ทำให้ค่าฟลักซ์ทั้งหมดเฉลี่ยสูงขึ้นประมาณ 2.3 เท่า (16.9 - 38.7 กรัม/ตร.ม.-ชม.) สำหรับ TCE และ 2.7 เท่า (19.1 - 52.3 กรัม/ตร.ม.-ชม.) สำหรับโทลูอิน ซึ่ง ฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นฟลักซ์ของน้ำที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 15-35 กรัม/ตร.ม.-ชม. และ 15-45 กรัม/ตร.ม.-ชม. สอดคล้องกับผลของการทดลอง 4.1 การดูดซึมในทางซิติโคนของสารละลายโทลูอินที่มีการดูดซึมน้ำปริมาณมากกว่าการดูดซึมสารละลาย TCE เมื่อพิจารณาเฉพาะฟลักซ์ของสารอินทรีย์เฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 4-8 กรัม/ตร.ม.-ชม.

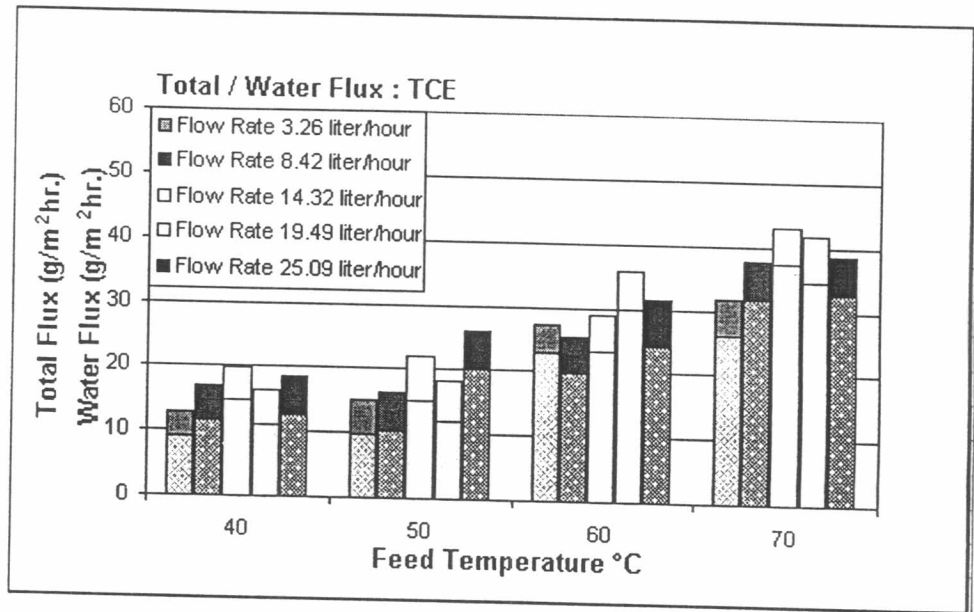
(ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.2.2) มีค่าน้อยกว่าฟลักซ์ของน้ำประมาณ 5-6 เท่า นั้นใกล้เคียงกับการทดลองของ Baker และคณะ (1997)



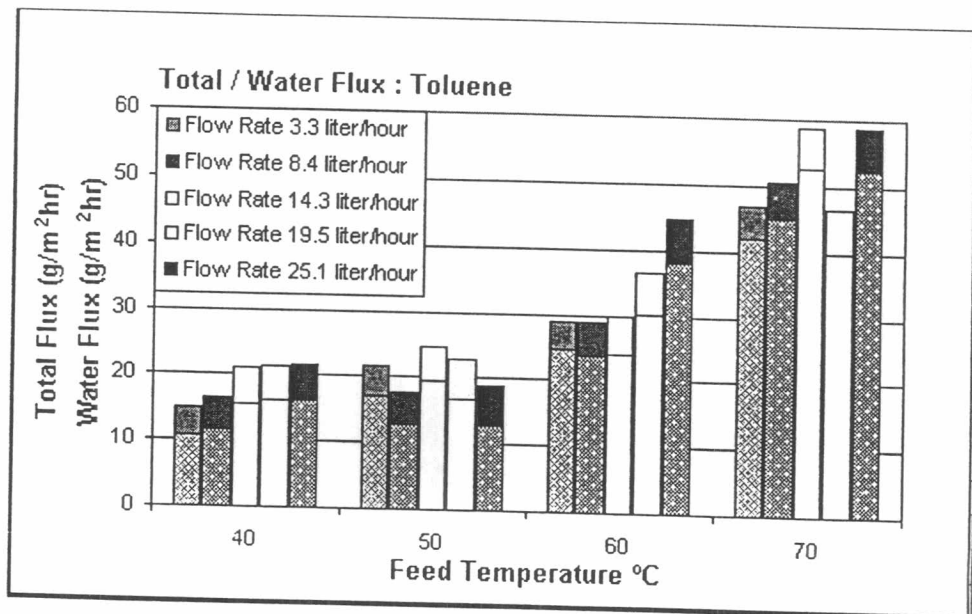
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและร้อยละการแยก TCE ที่อัตราไหลของสารป้อนต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและร้อยละการแยกโทลูอิน ที่อัตราไหลของสารป้อนต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์รวม/ฟลักซ์ของน้ำ (พื้นที่แรงเงา) จากการทดลองเพอร์เวพอร์ชันสารละลาย TCE ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์รวม/ฟลักซ์ของน้ำ (พื้นที่แรงเงา) จากการทดลองเพอร์เวพอร์ชันสารละลายโทลูอิน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน

4.2.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อฟลักซ์ของสารอินทรีย์

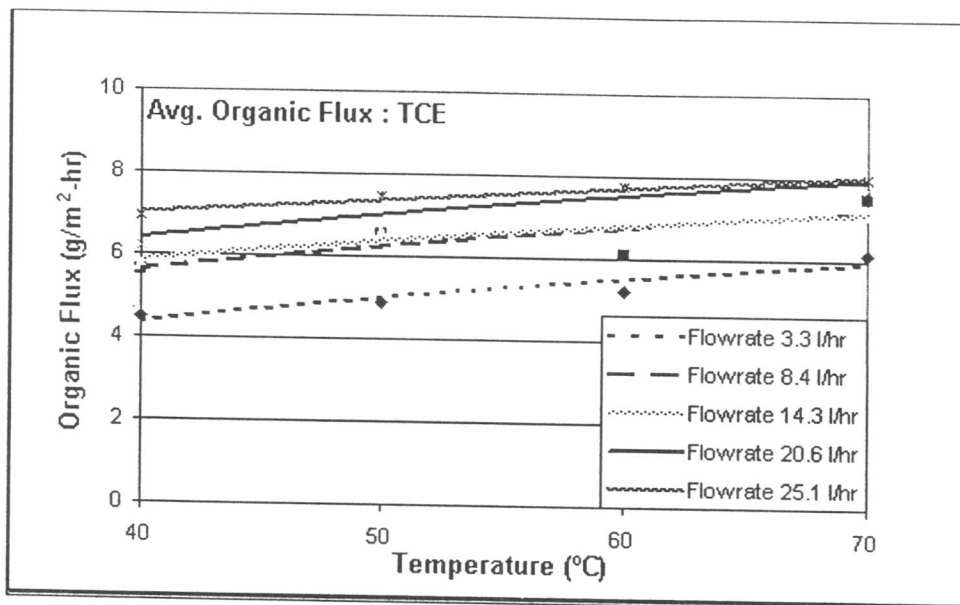
รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาที่ทำ การทดลองเพอร์เวพรชันกับสารละลาย TCE และ โทลูอิน พบว่าค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เฉลี่ยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 4-8 กรัม/ตร.ม.-ชม. ฟลักซ์ของสารอินทรีย์เฉลี่ยที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วผลของอุณหภูมิของสารป้อน (40-70°C) และอัตราการไหลของสารป้อน (3.3-25.1 ลิ./ชม.) ให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 0.25 เท่าของค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิและอัตราไหลของสารป้อน 40 °C และ 3.3 ลิ./ชม.

เมื่อพิจารณาในแต่ละการทดลองค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (ΔC_{lm}) ดังรูป 4.14 (ก.-ง.) และ 4.15 (ก.-ง.) สำหรับการทดลองกับสารละลาย TCE และ โทลูอิน ตามลำดับ พบว่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์มีค่าสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนสูงสุด และลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีแบบจำลองการถ่ายเทมวล ฟลักซ์ของสารอินทรีย์ลดลงตามแรงขับเคลื่อนของระบบคือความดันไอย่อยของสารอินทรีย์ในสารป้อนลดลง และฟลักซ์ของสารอินทรีย์แปรผันตามความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารป้อนผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Psaume และคณะ (1988) Nijhuis และคณะ (1999)

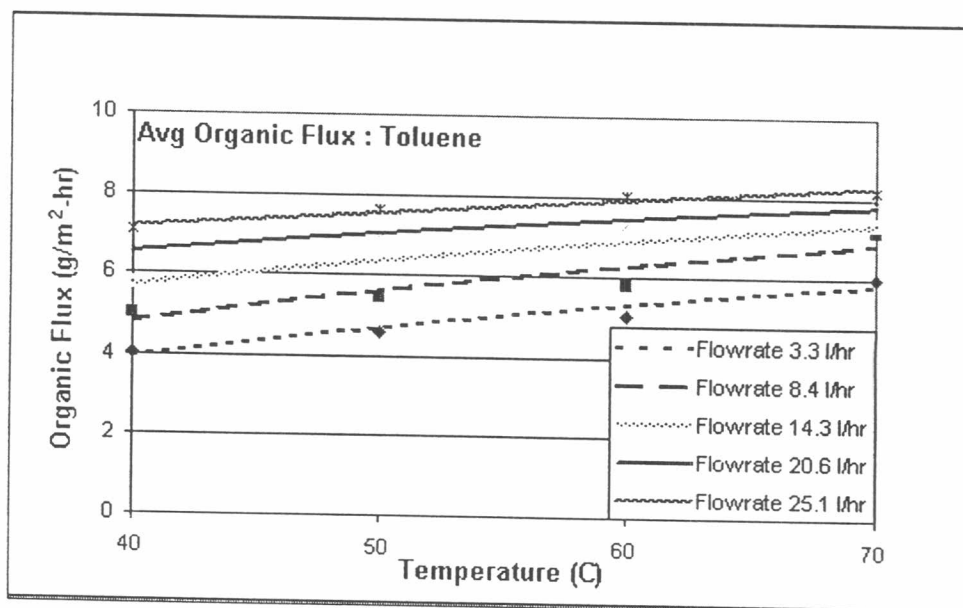
ค่าพลังงานกระตุ้นของการซึมผ่าน E_p อธิบายด้วยความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกับสมการ 2.44

$$J_i = J_o \exp(-E_p/RT) \quad (2.44)$$

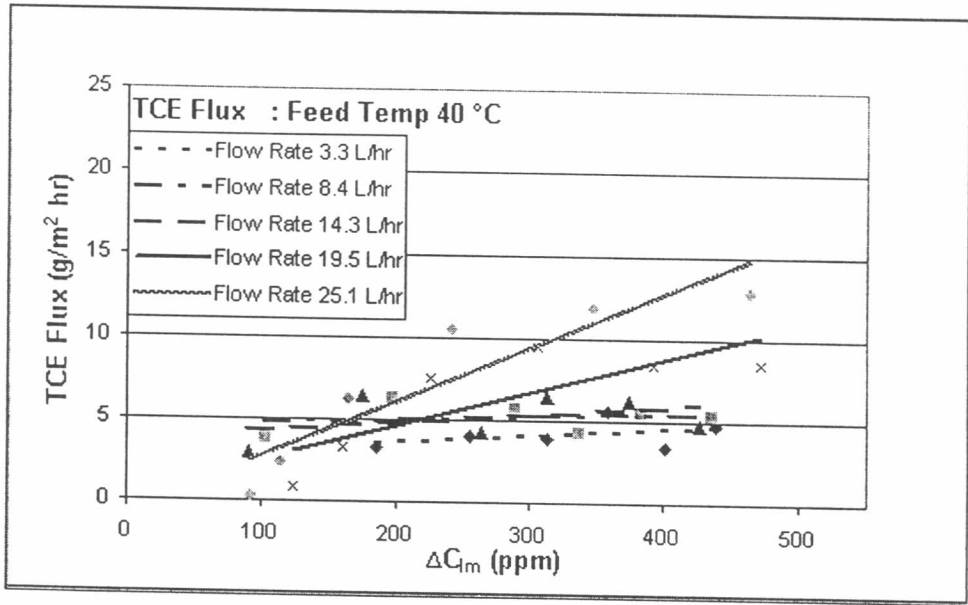
รูปที่ 4.16 แสดงฟลักซ์ของสารอินทรีย์และอุณหภูมิของสารป้อน ที่อัตราการไหลของสารป้อน 14.3 ลิ./ชม. ความเข้มข้นของสารละลายอยู่ในช่วง 200-300 พีพีเอ็ม ซึ่งสอดคล้องกับสมการ 2.44 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นการซึมผ่านของ TCE และ โทลูอินเท่ากับ 20.39 และ 19.28 KJ/mol ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่เพิ่มสูงขึ้นมีต่อการซึมผ่านของเยื่อแผ่นของโทลูอินมีมากกว่า TCE เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่านั่นเอง



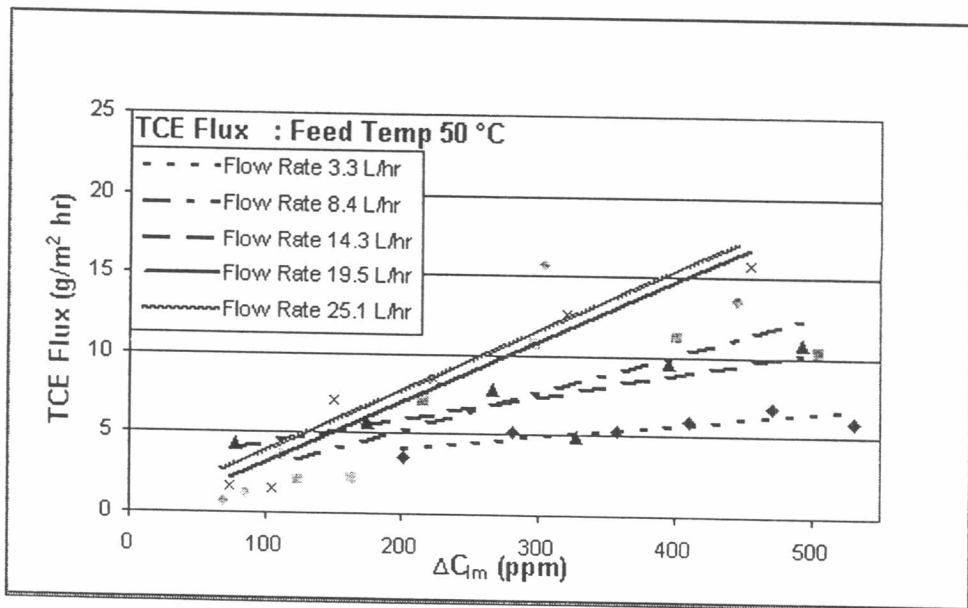
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE จากการทดลองเพอร์เวแพเรชันที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน



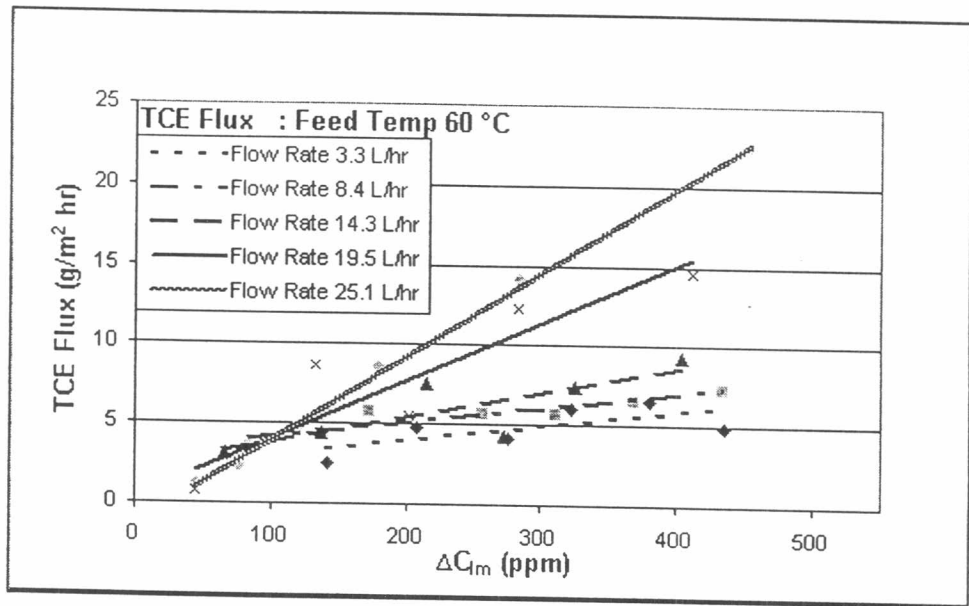
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์ของ โทลูอิน จากการทดลองเพอร์เวแพเรชันที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน



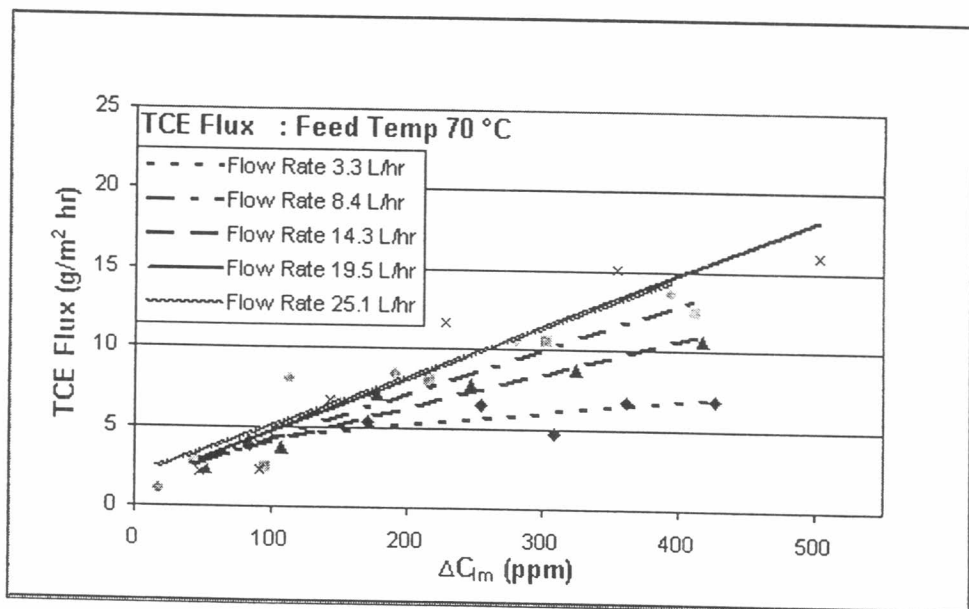
รูปที่ 4.14 ก ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE ที่อุณหภูมิของสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



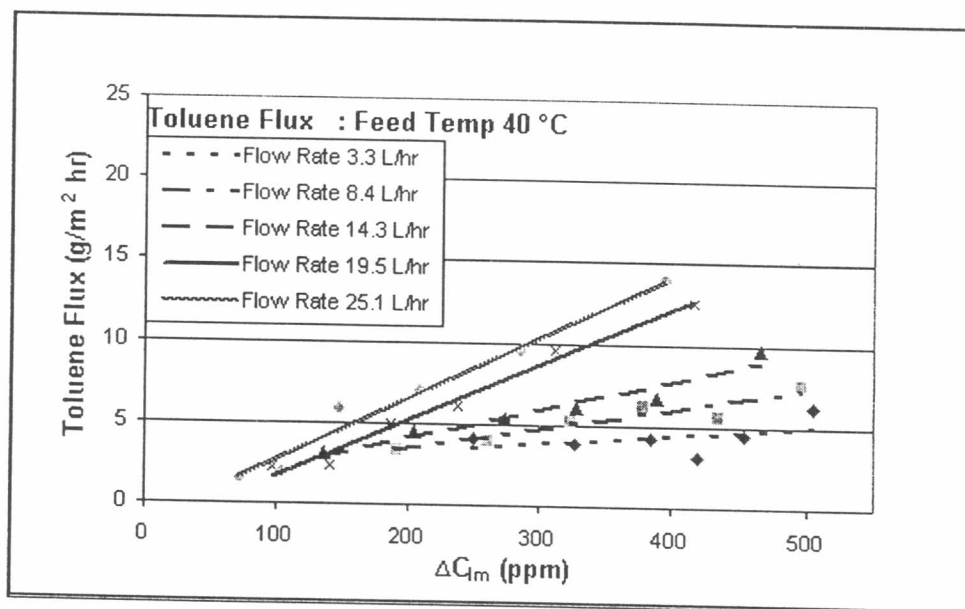
รูปที่ 4.14 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE ที่อุณหภูมิของสารป้อน 50 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



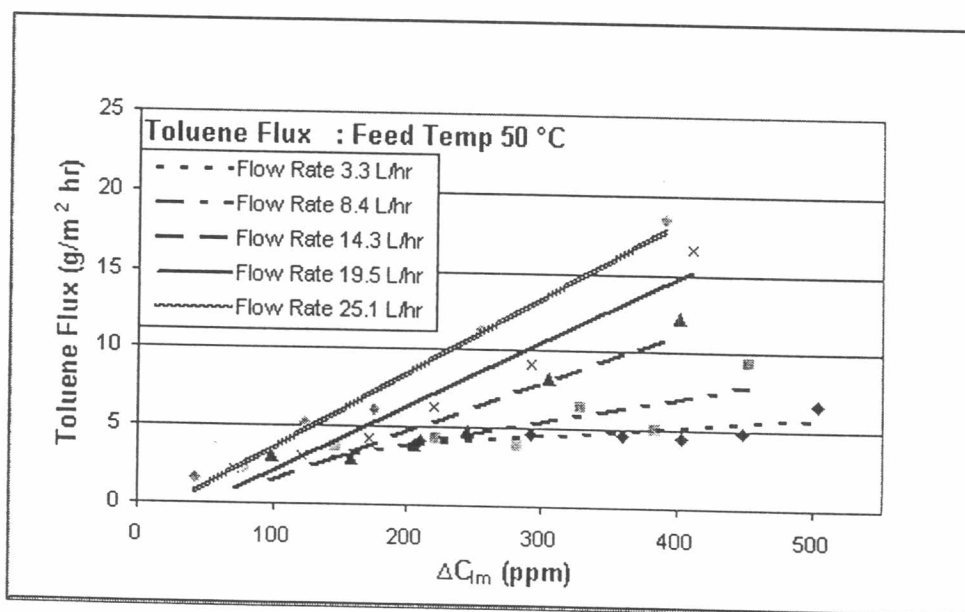
รูปที่ 4.14 ค ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE ที่อุณหภูมิของสารป้อน 60 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



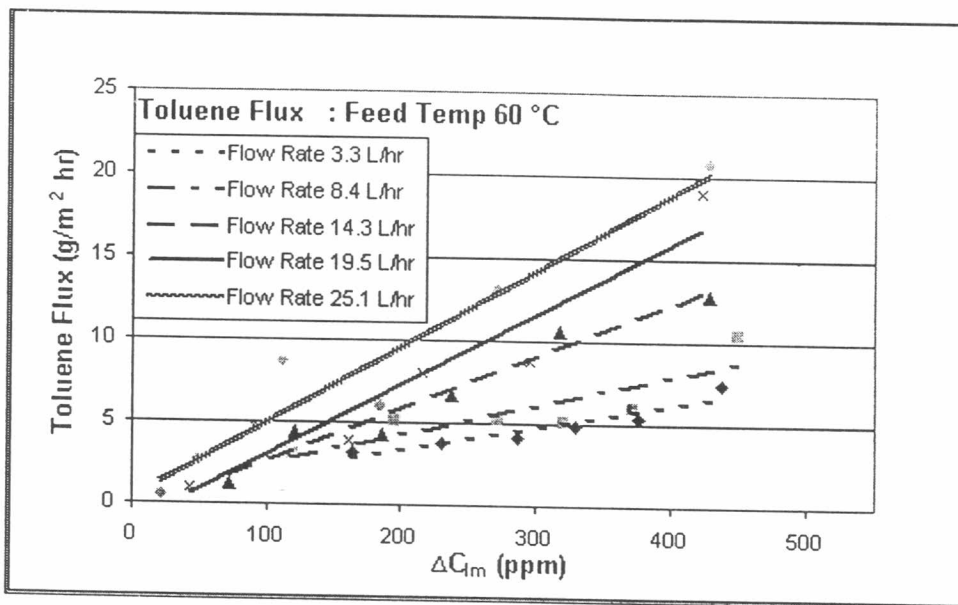
รูปที่ 4.14 ง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE ที่อุณหภูมิของสารป้อน 70 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



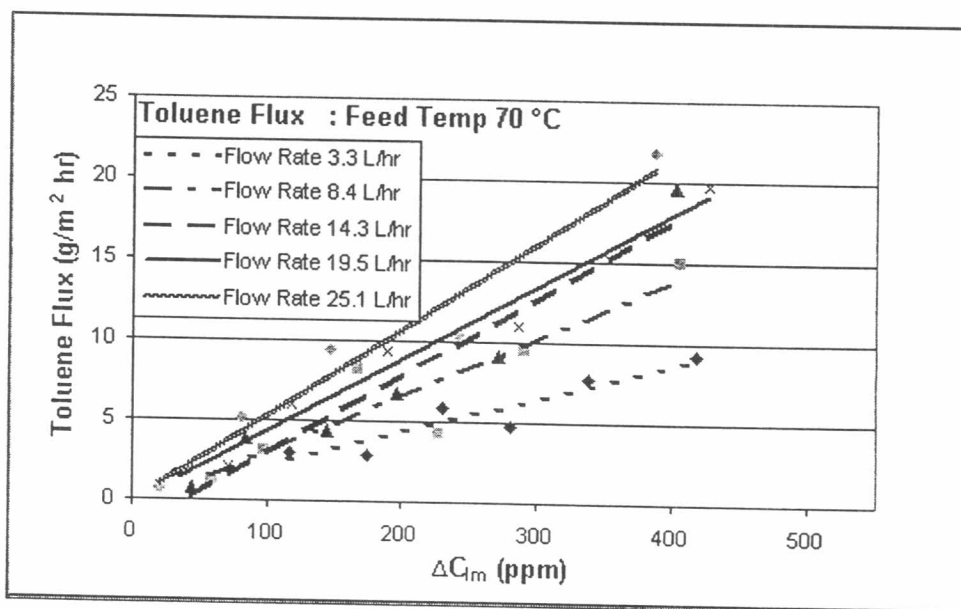
รูปที่ 4.15 ก ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของโทลูอีน ที่อุณหภูมิของสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



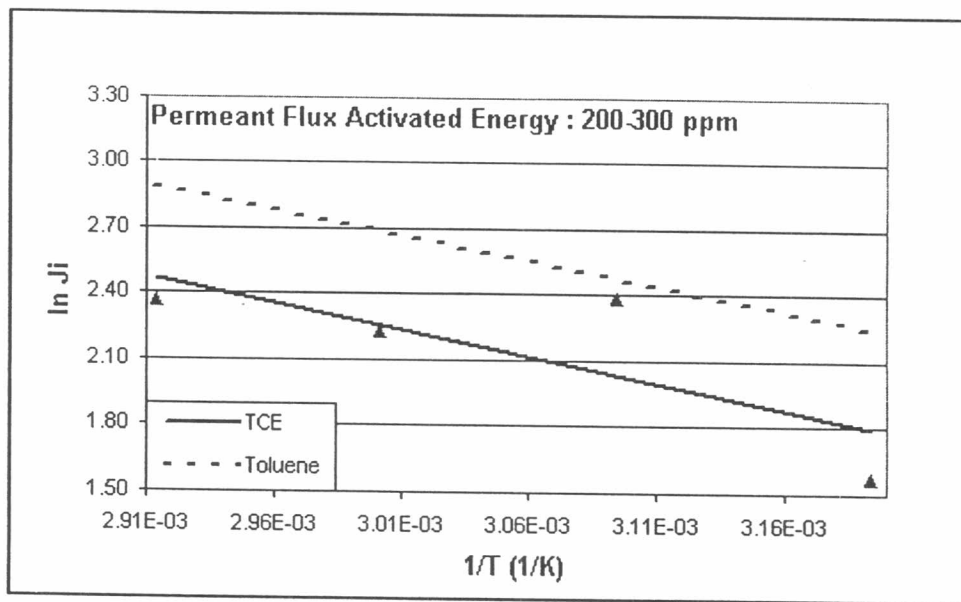
รูปที่ 4.15 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของโทลูอีน ที่อุณหภูมิของสารป้อน 50 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ค ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของโทลูอีน ที่อุณหภูมิของสารป้อน 60 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของโทลูอีน ที่อุณหภูมิของสารป้อน 70 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่า $\ln J_i$ และ $1/T$ เพื่อกำหนดค่าพลังงานกระตุ้นการซึมผ่าน (E_p) ดังสมการ 2.44 ของสารละลาย TCE และ โทลูอิน

4.2.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อความสามารถของการซึมผ่าน (permeability) และความสามารถของการแพร่ (diffusivity)

การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนต่อลักษณะจำเพาะของกระบวนการเพอร์เวอเรชันของชุดทดลอง พิจารณาค่าความสามารถของการซึมผ่านและความสามารถในการแพร่ของเยื่อแผ่นที่เปลี่ยนไป โดยนำค่าความสามารถในการละลายจากการทดลองการดูดซึมสารละลายอินทรีย์ ในหัวข้อ 4.1 มาประกอบการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความสามารถของการแพร่

จากรูป 4.17 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการซึมผ่านของสารอินทรีย์ (permeability ; P_i) เฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง และอัตราการไหลของสารป้อน ตามแบบจำลองการถ่ายเทมวลแบบการละลาย-การแพร่ ดังสมการ 2.28 พบว่าค่า P_i มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารป้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาตลอดเวลาที่ทำการทดลองค่า P_i มีค่าสูงสุด 7.1×10^{-9} และ 7.2×10^{-9} ทรม./ชม. สำหรับการทดลองสารละลาย TCE และ โทลูอินตามลำดับ

$$J_i = \frac{P_i}{l}(C_0 - p_i/H_i) \quad (2.28)$$

$$J_i = \frac{P_i}{l}(C_0 - n_i p_i/H_i) \quad (4.7)$$

n_i คือ เศษส่วนเชิงโมลของ i ในเพอร์มิเอท

ผลของแรงขับเคลื่อนของระบบคังสมการที่ 4.7 เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อค่า P_i ของระบบ เนื่องจากค่าแรงขับเคลื่อนของระหว่าง 2 ฝั่งของเยื่อแผ่นขึ้นกับสัดส่วนค่าความดันไอต่อค่าคงที่ของเฮนรี (p_i/H_i) ของโพลูอินนั้นน้อยกว่าของ TCE ซึ่งผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่ของเฮนรีขององค์ประกอบนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อค่า P_i ที่สูงขึ้น (Lipnizki และคณะ 1999) ค่าค่าคงที่เฮนรีของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ ก.1

จากสมการ 4.7 จึงสามารถอธิบายได้ว่าคุณสมบัติของสารอินทรีย์นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างมาก ซึ่ง TCE และโพลูอินเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าความดันไอสูงและเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ที่มีความดันไอต่ำ ดังนั้นฟลักซ์ของสารอินทรีย์ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า เมื่อความเข้มข้นของสารป้อนสู่ระบบเท่ากัน

จากสมการ 4.8 ค่าความสามารถของการซึมผ่านเป็นผลคูณของค่าความสามารถของการแพร่ (diffusivity ; D_i) กับค่าความสามารถของการละลาย (solubility ; S_i) ซึ่งได้มาจากการทดลองการดูดซึมสารละลาย TCE และโพลูอิน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 รูป 4.19 และ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่และอัตราการใช้ของสารป้อน คำนวณได้จากสมการ 4.8

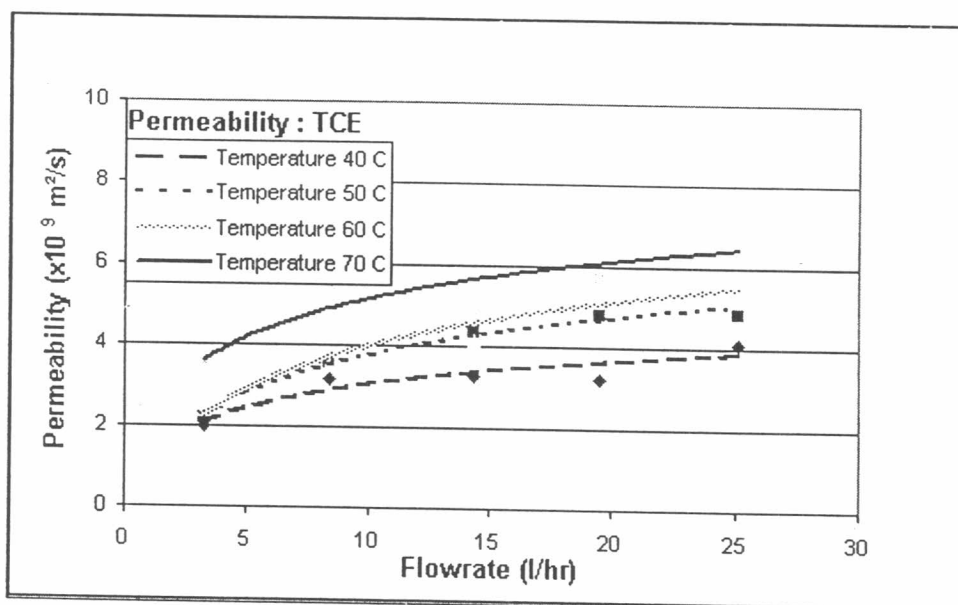
$$P_i = D_i S_i \quad (4.8)$$

เมื่อพิจารณาค่า D_i ตลอดช่วงการทดลองมีค่าสูงสุด 3.7×10^{-11} และ 4.7×10^{-11} ตรม./ชม. สำหรับการทดลองสารละลาย TCE และโพลูอินตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า D_i จากการทดลองกับสารละลายโพลูอินมีค่าสูงกว่า TCE เนื่องจากค่าความสามารถของการละลายของ TCE นั้นสูงกว่า ทำให้ค่า D_i ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากสมการ 4.8 มีค่าต่ำกว่าค่า D_i ของสารละลายโพลูอิน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของณรงค์ชัย (2539) และอื่นๆ ที่ค่า D_i ลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบเพอร์มิเอทสูงขึ้น

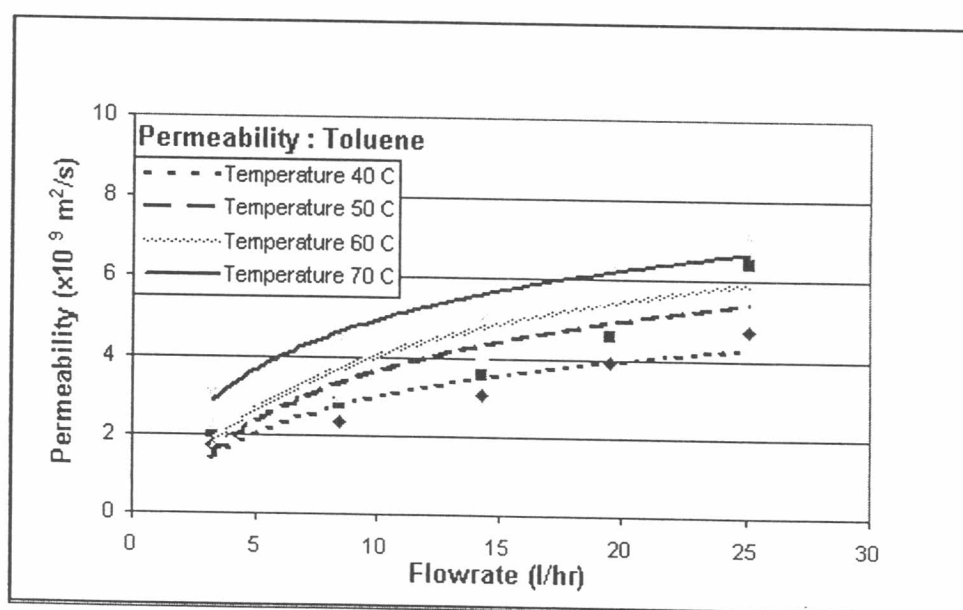
ในทางกลับกันผลของอุณหภูมิสารป้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่า D_i ซึ่งจะมีค่าลดลงเป็นผลจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 70 °C ส่งผลต่อค่า S_i เพิ่มขึ้นประมาณ 2.75 เท่า และเมื่อเทียบ

กับค่า P_i ซึ่งมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.5 - 1 เท่านั้นทำให้ค่า D_i ที่อธิบายได้จากสมการ 4.4 นั้นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อน

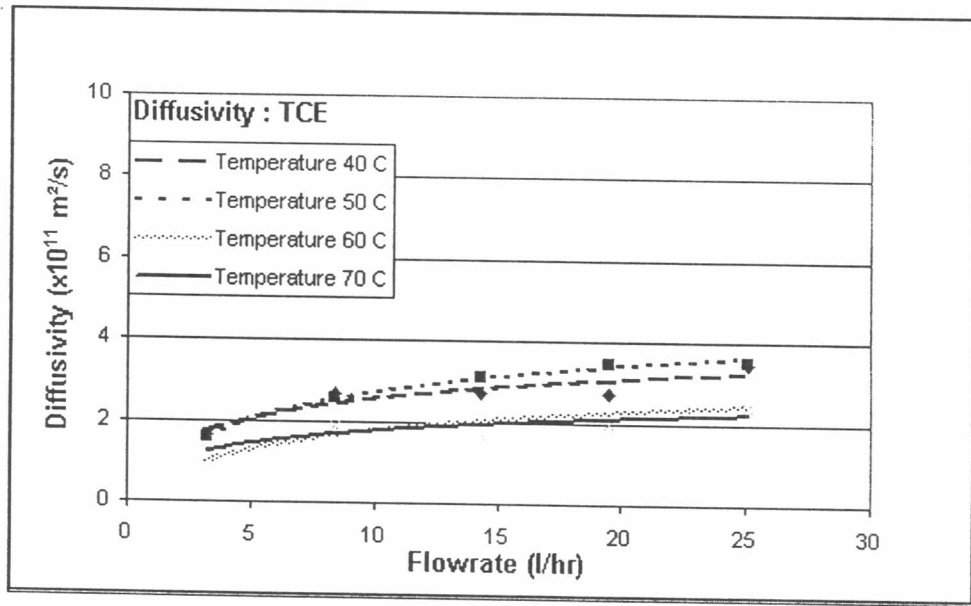
รูปที่ 4.21 (ก.-ง.) และ 4.22 (ก.-ง.) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ (diffusivity ; D_i) กับอัตราการไหลของสารป้อนที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน และความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200-300 พีพีเอ็ม พบว่าค่า D_i ของสารละลาย TCE และโทลูอินอยู่ในช่วง $1-4 \times 10^{-11}$ และ $2-6 \times 10^{-11}$ ตร.ม./ชม. ตามลำดับ ขึ้นกับอัตราไหลของสารป้อนที่สูงขึ้น โดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า P_i ที่คำนวณได้จากสมการ 4.7 ผลของอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อค่าความสามารถของการแพร่ให้สูงขึ้นนั้นเกิดจากอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้ความเร็วที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นสูงขึ้น และลดความหนาของชั้นของเหลวที่เป็นผลจากปรากฏการณ์ concentration polarization ลง (Psaume และคณะ, 1988) ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นลง



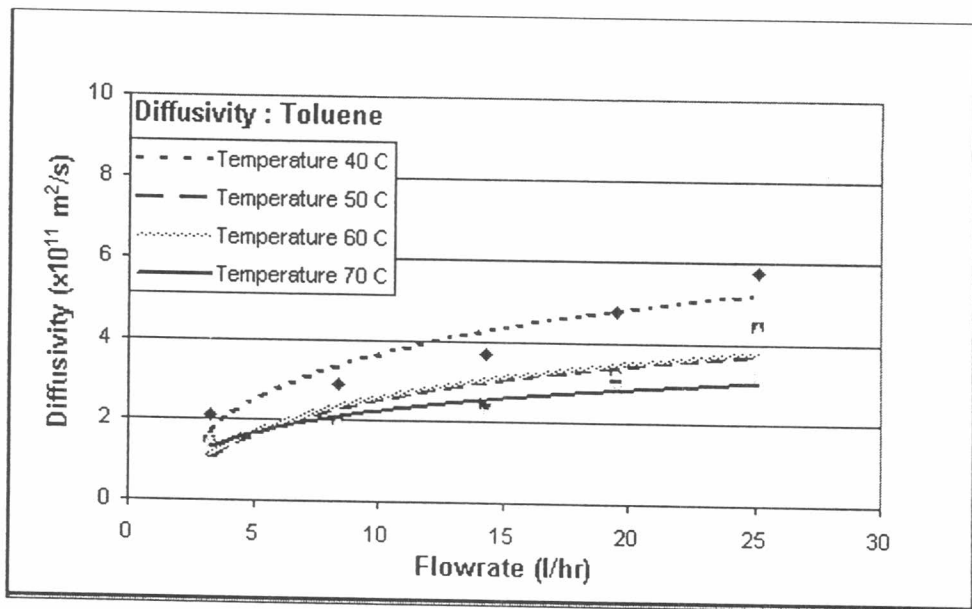
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการซึมผ่านของ TCE เฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน



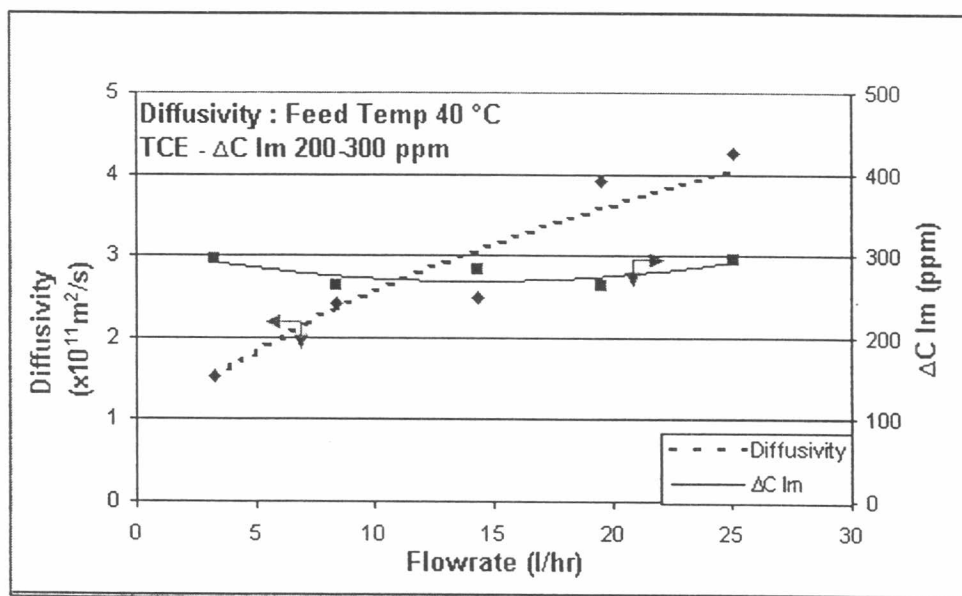
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการซึมผ่านของโทลูอิน เฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน



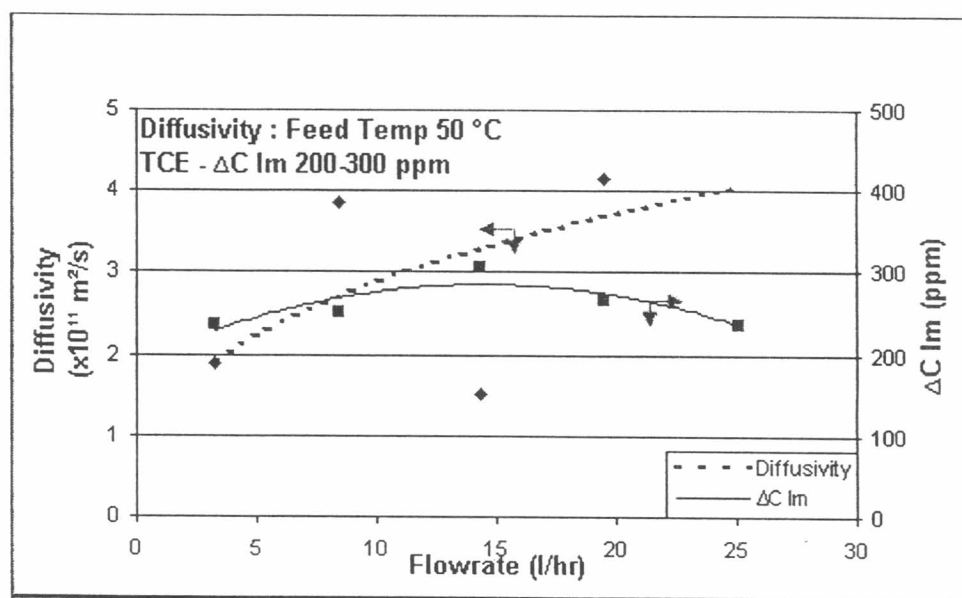
รูป 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE เฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน



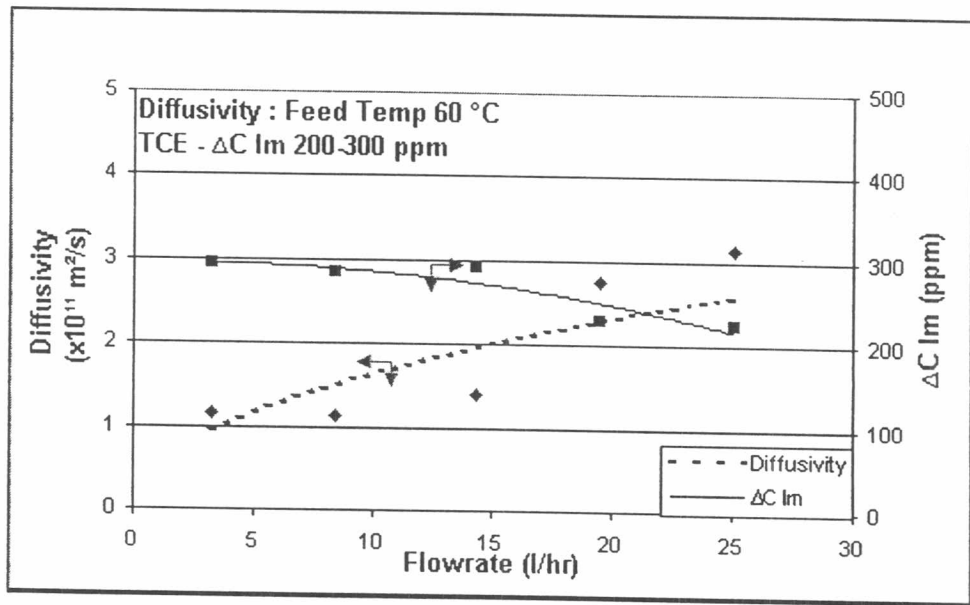
รูป 4.20 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของโทลูอิน เฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน



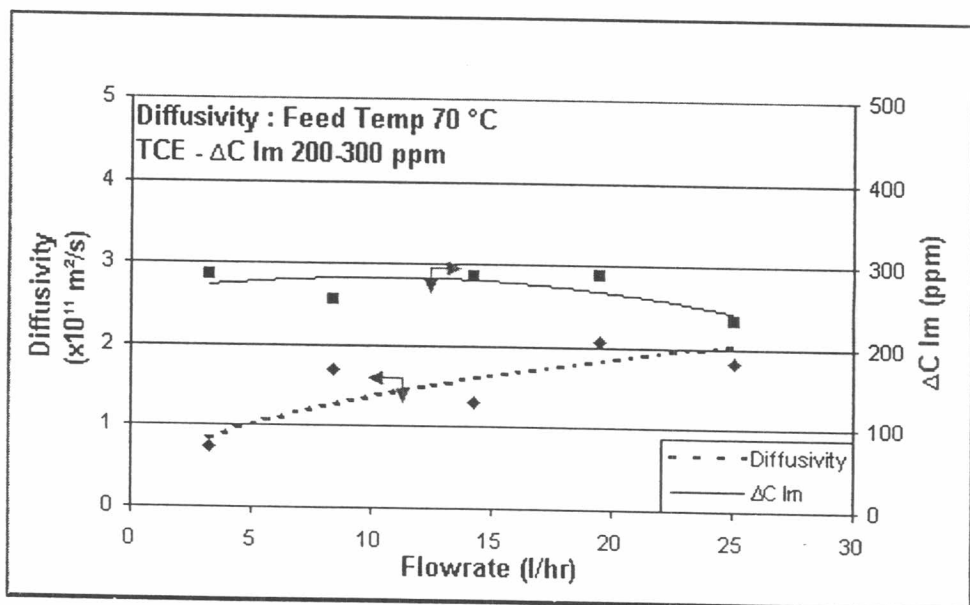
รูปที่ 4.21 ก ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE และอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 40 °C



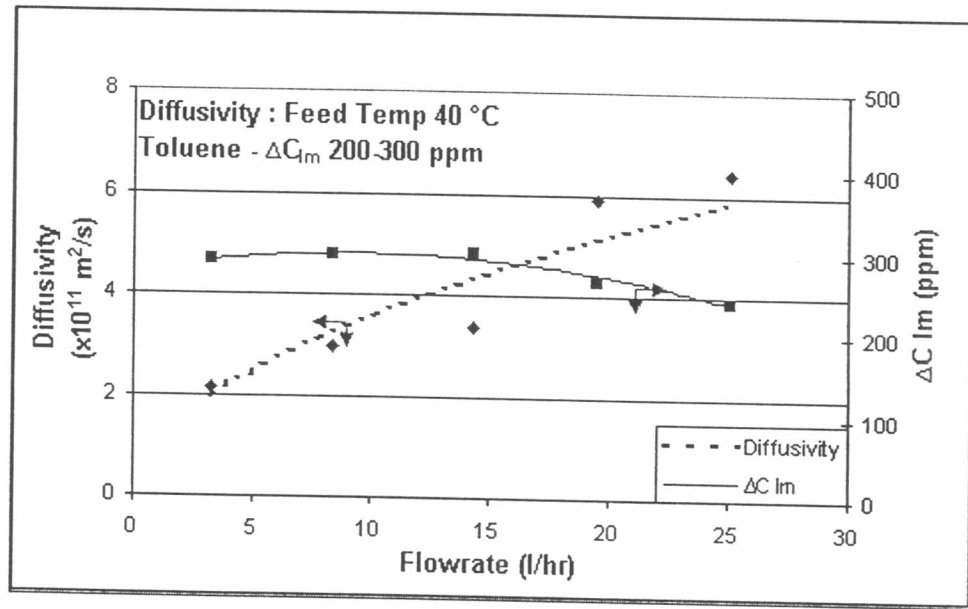
รูปที่ 4.21 ข ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE และอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 50 °C



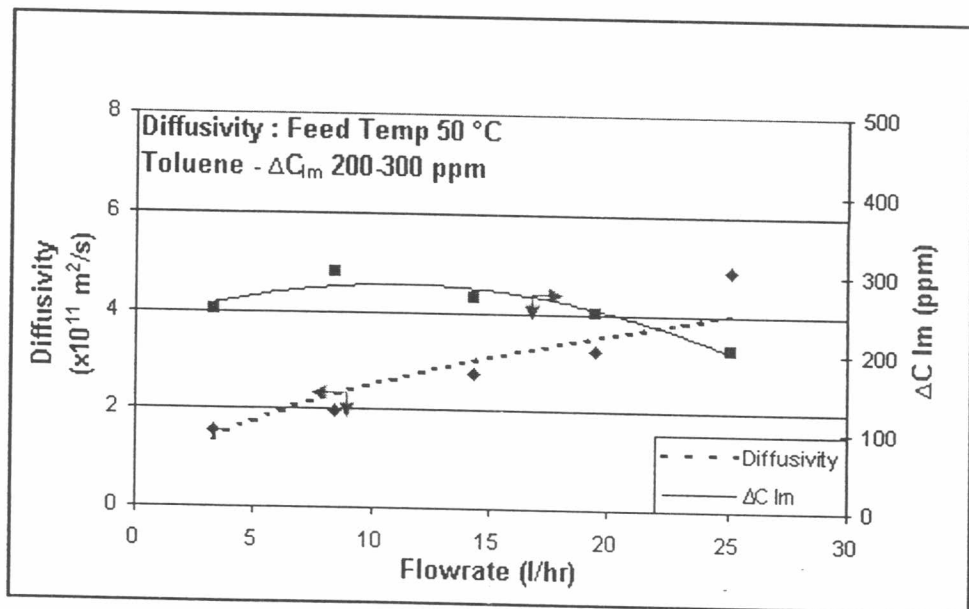
รูปที่ 4.21 ค ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE และอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 60 °C



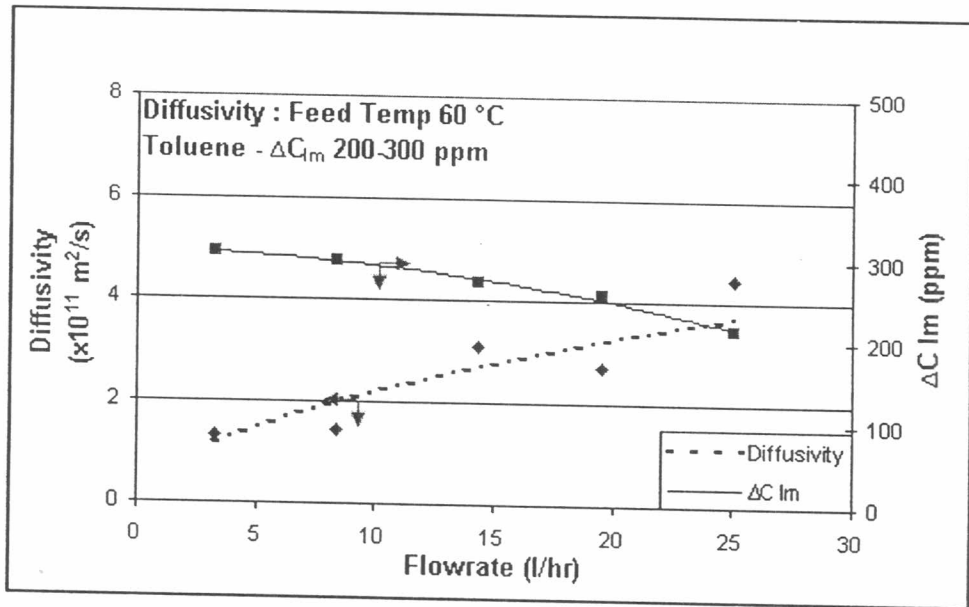
รูปที่ 4.21 ง ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE และอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 70 °C



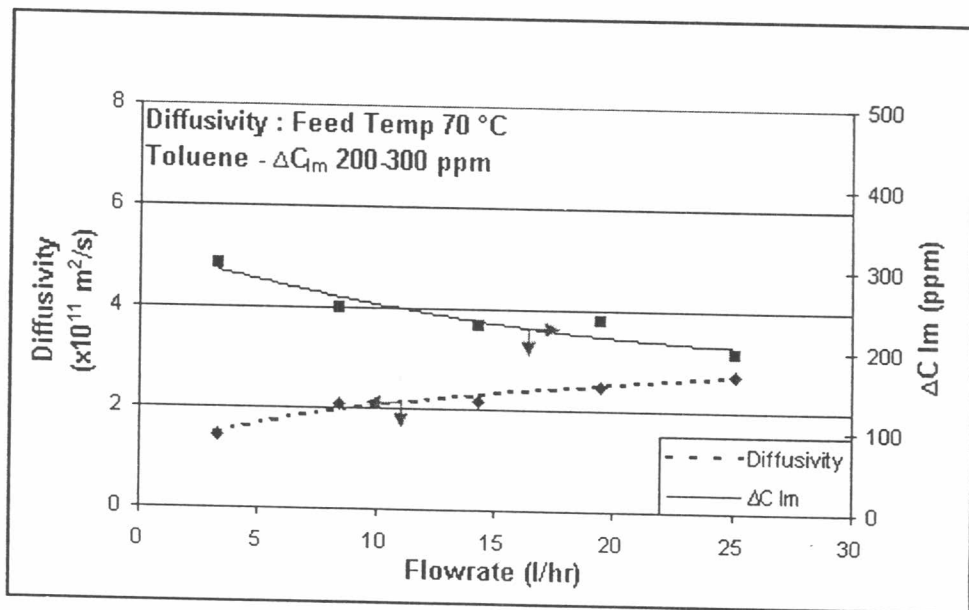
รูปที่ 4.22 ก ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของโทลูอินและอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 40 °C



รูปที่ 4.22 ข ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของโทลูอินและอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 50 °C



รูปที่ 4.22 ค ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของโทลูอินและอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 60 °C



รูปที่ 4.22 ง ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของโทลูอินและอัตราการไหลของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 70 °C

4.2.4 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อความสามารถของการเลือก (selectivity ; α)

ความสามารถของการเลือกของระบบ (selectivity ; α) เป็นค่าบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการแยกสารอินทรีย์ในสารละลาย ความสามารถในการเลือกที่สูงหมายถึงระบบมีประสิทธิภาพในการแยกที่สูงอธิบายได้ด้วยสมการ 2.44 เมื่อ C คือความเข้มข้นโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ i และ j ในฝั่งสารป้อน (o) และฝั่งเพอร์มิเอท (l)

$$\text{Selectivity ; } \alpha_i = \frac{(C_i/C_{j_r})}{(C_i/C_{j_o})} \quad (2.44)$$

รูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการเลือกที่ได้จากการทดลองของทั้ง 2 สารละลายและอุณหภูมิของสารป้อน ที่อัตราการไหลของสารป้อนต่าง ๆ กันและความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม พบว่าความสามารถของการเลือกมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 700-3,200 โดยที่ความสามารถของการเลือกที่ได้จากการทดลองของสารละลาย TCE มีค่าสูงกว่าของโทลูอินเล็กน้อย และผลของอุณหภูมิของสารป้อนมีผลอย่างมากต่อความสามารถของการเลือก ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารป้อนสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิของสารป้อนสูง ๆ นั้น ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้นั้นมีค่าสูงมากทำให้ความเข้มข้นของเพอร์มิเอทที่คำนวณได้นั้นมีค่าสูงกว่าการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่สภาวะของการทดลองที่อุณหภูมิของสารป้อนที่ 50 °C มีความสามารถในการเลือกที่สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ผลของอัตราไหลของสารป้อนจากการทดลองสารละลายทั้งสองชนิดมีผลต่อความสามารถของการเลือกสูงขึ้นและฟลักซ์ของสารอินทรีย์ ตามอัตราการไหลของสารป้อนที่สูงขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ Baker และคณะ (1997)

4.2.5 ค่าดัชนีการแยกของกระบวนการเพอร์เวพอเรชัน (Pervaporation Separation Index ; PSI)

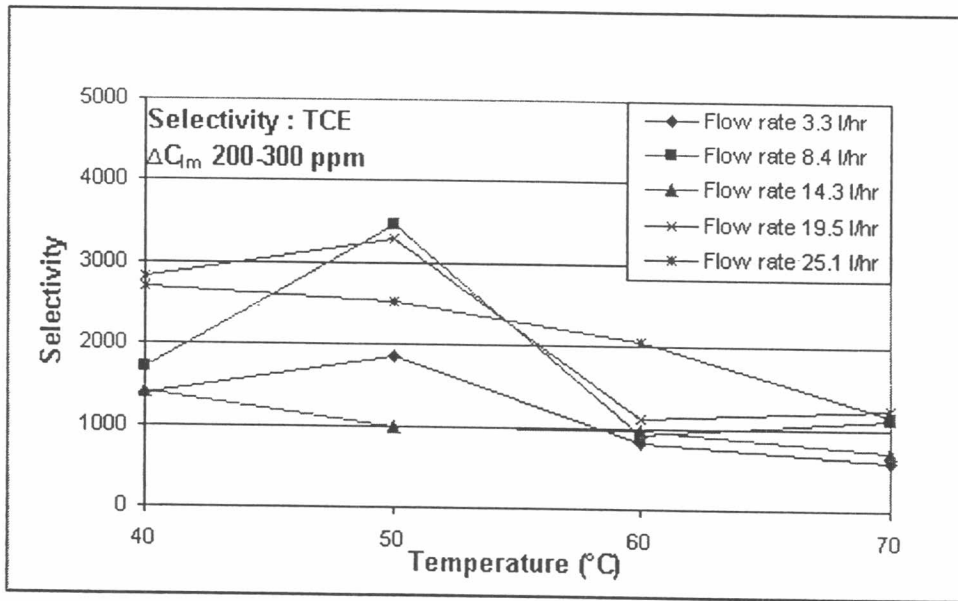
ค่าดัชนีการแยกของกระบวนการเพอร์เวพอเรชัน (PSI) เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงสภาวะเหมาะสมของระบบ เมื่อพิจารณาฟลักซ์ของสารอินทรีย์และความสามารถในการเลือกของระบบซึ่งอธิบายได้ดังสมการ 4.26

$$\text{PSI} = J \times \alpha \quad (2.46)$$

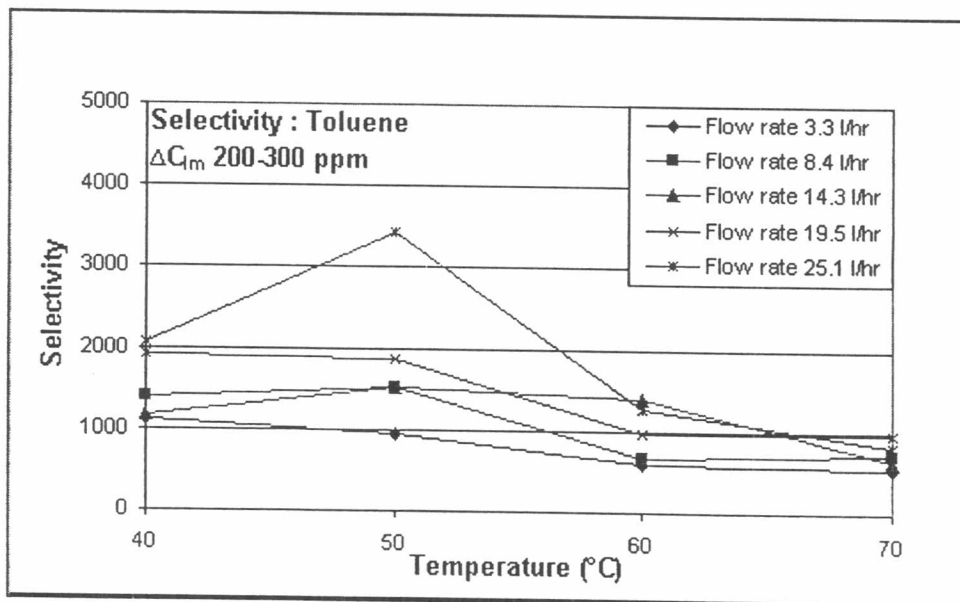
รูป 4.25 และ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการแยกของกระบวนการเพอร์เวพอเรชันที่ได้จากการทดลองของทั้ง 2 สารละลายและอุณหภูมิของสารป้อน ที่อัตราการไหลของสารป้อนต่าง ๆ กันและความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม ผลที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับความสามารถของการเลือกจากหัวข้อ 4.2.4 มีค่าแปรตามอัตราการไหลของสารป้อน มีค่าอยู่ในช่วง

ประมาณ 3,000 - 40,000 และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของสารป้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากผลของความสามารถของการเลือกที่อุณหภูมิสูง 60 และ 70 °C มีค่าต่ำทำให้ค่า PSI ที่ได้จากการคำนวณนั้นลดลง และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงช่วงความเข้มข้น 0-100 พีพีเอ็ม ที่มีค่า PSI ที่มีค่าน้อยกว่าที่ความเข้มข้นที่สูงอย่างเห็นได้ชัด จากทั้งการทดลองของสารละลายสองชนิด เนื่องมาจากค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ นั้นมีค่าน้อยมาก

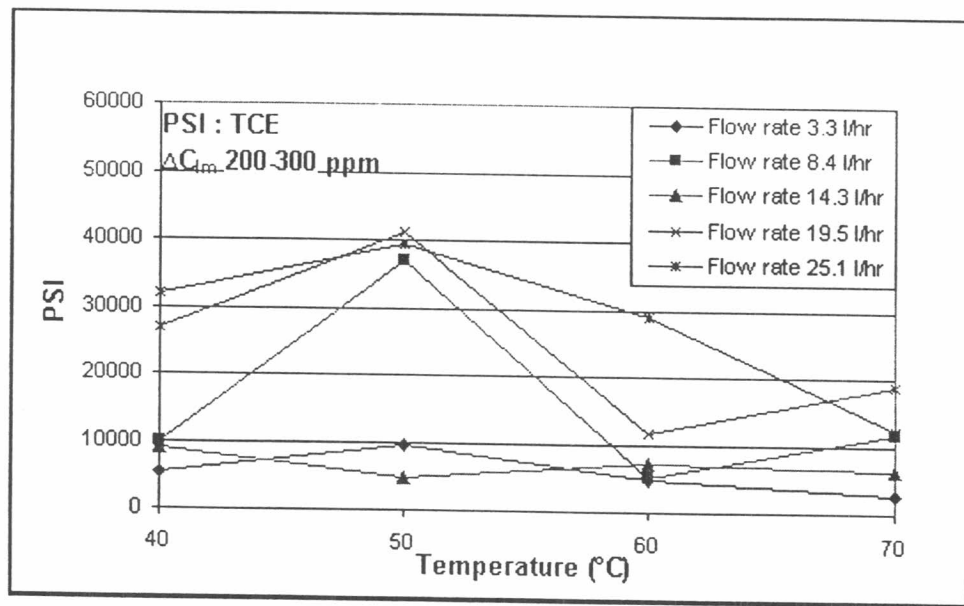
ดังนั้นเมื่อนำค่า PSI มาเป็นเกณฑ์ในการเลือกสถานะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิของสารป้อนที่ 50 °C และอัตราไหลของสารป้อนเท่ากับ 25.1 ล./ชม. ซึ่งเป็นอัตราการไหลของสารป้อนที่สูงสุดที่ทำการทดลอง และมีแนวโน้มที่ค่า PSI เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนที่สูงขึ้นอีก



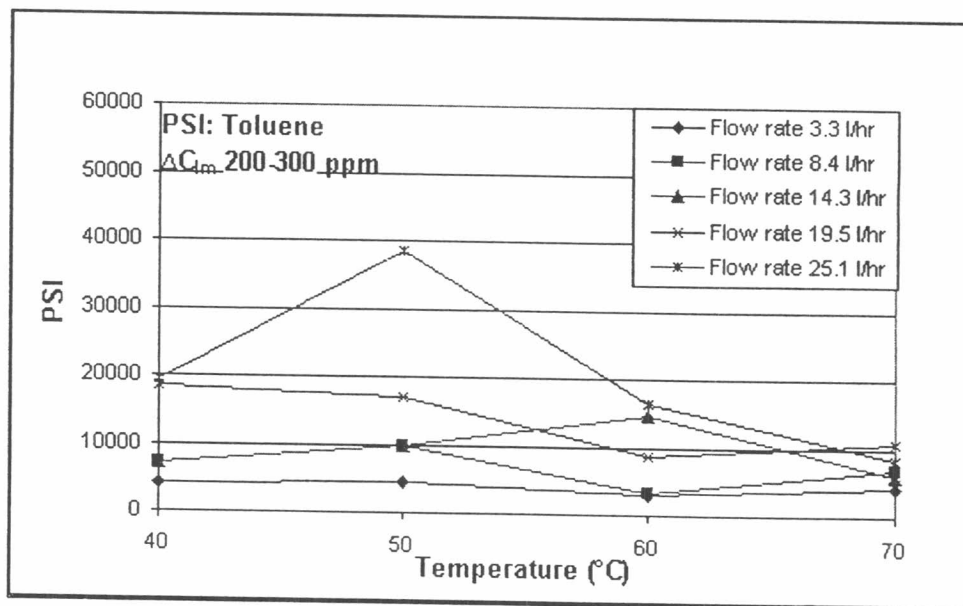
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการเลือกจากการทดลองแยกสารละลาย TCE และสภาวะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการเลือกจากการทดลองแยกสารละลายโทลูอีนและสภาวะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSI จากการทดลองแยกสารละลาย TCE และสถานะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSI จากการทดลองแยกสารละลายโทลูอีนและสถานะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 พีพีเอ็ม