

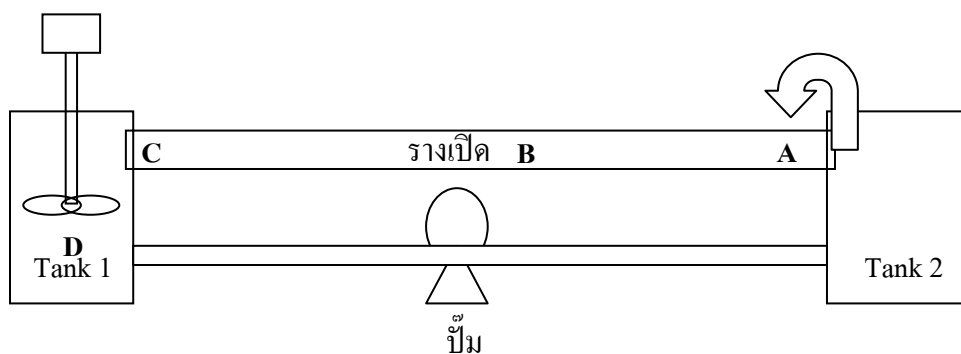
### บทที่ 3

#### ผล และวิจารณ์

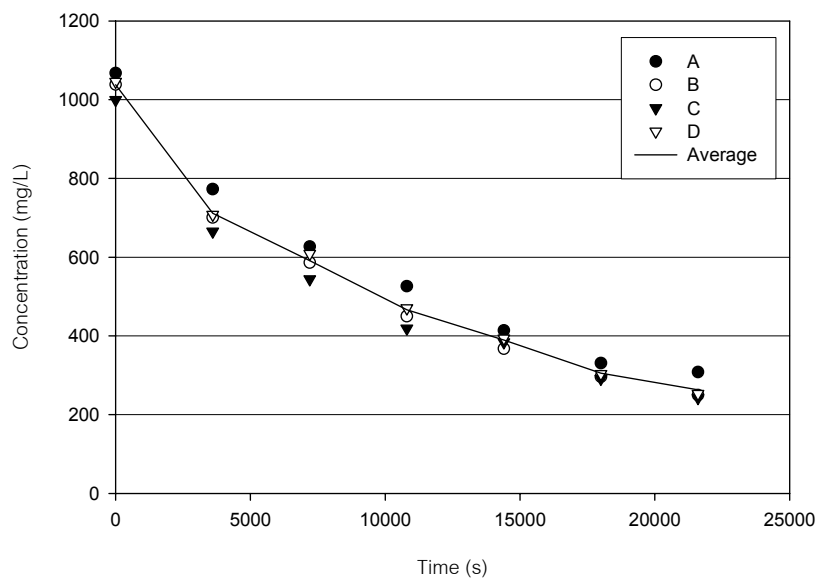
#### 1. ผลของความเร็วในการไหลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

##### 1.1 ผลของตำแหน่งการเก็บตัวอย่างในของเหลวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOCs

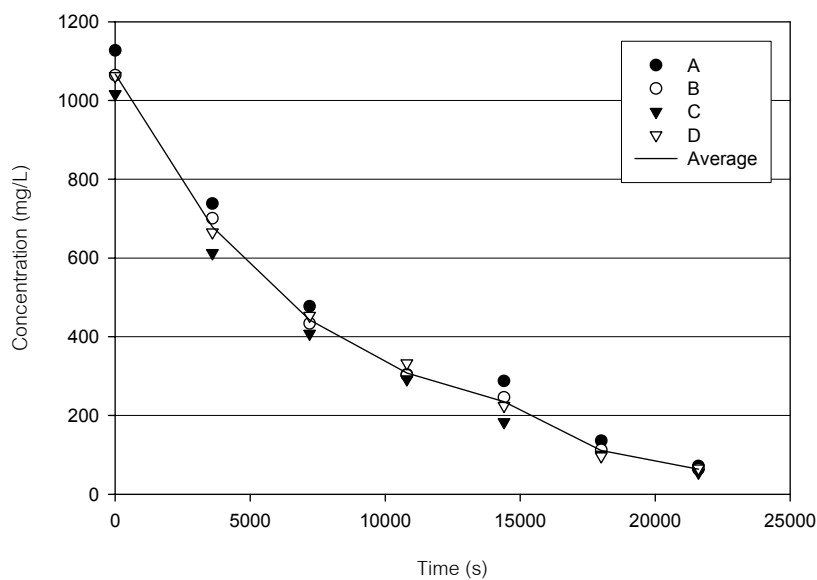
การทดลองทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย VOCs ในรางเปิดจำนวน 4 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่งต้นราง กลางราง ปลายราง และในถัง ซึ่งแทนด้วย A, B, C, D ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ VOCs กับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ตลอดความยาวของรางเปิด แสดงดังภาพประกอบ 6 และภาพประกอบ 7 สำหรับการระเหยของอะซีโตนจากน้ำภายใต้สภาวะการไหลแบบราบเรียบ และภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนตามลำดับ จากภาพประกอบเหล่านี้ พบว่าความเข้มข้นของ VOCs ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและพบว่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร็วในการไหลสูงขึ้นการระเหยของอะซีโตนจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยสังเกตจากความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการไหลสูงขึ้นและจากกราฟพบว่าความเข้มข้นของ VOCs ที่วัดได้ ณ เวลาใดๆ จากตำแหน่งต่างๆ ของการเก็บตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard deviation , RSD) น้อยกว่า 28 ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นจาก 4 ตำแหน่งเป็นตัวแทนของความเข้มข้นที่เวลาใดๆ



ภาพประกอบ 5 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาผลของความเร็วในการไหลของชั้นน้ำต่อการระเหยของ VOCs



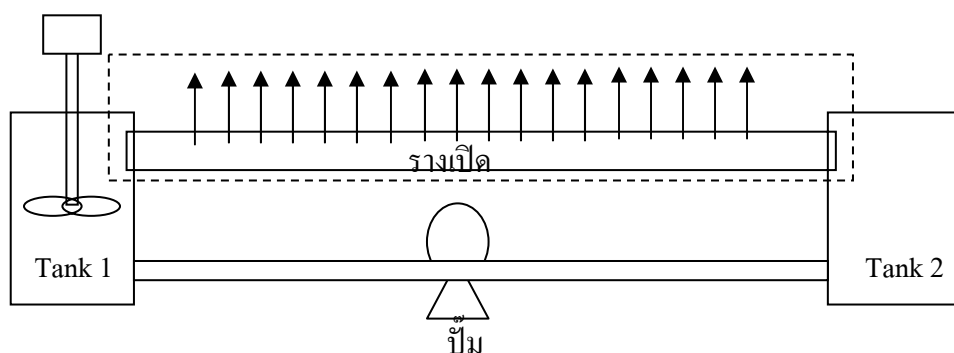
ภาพประกอบ 6 แสดงความเข้มข้นกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับการระเหยของอะซีโตนจากน้ำที่มีการไหลแบบราบเรียบ ( $Re = 1220$ ) ความเข้มข้นเริ่มต้นของอะซีโตน  $1,000 \text{ mg/l}$  อุณหภูมิของน้ำ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$



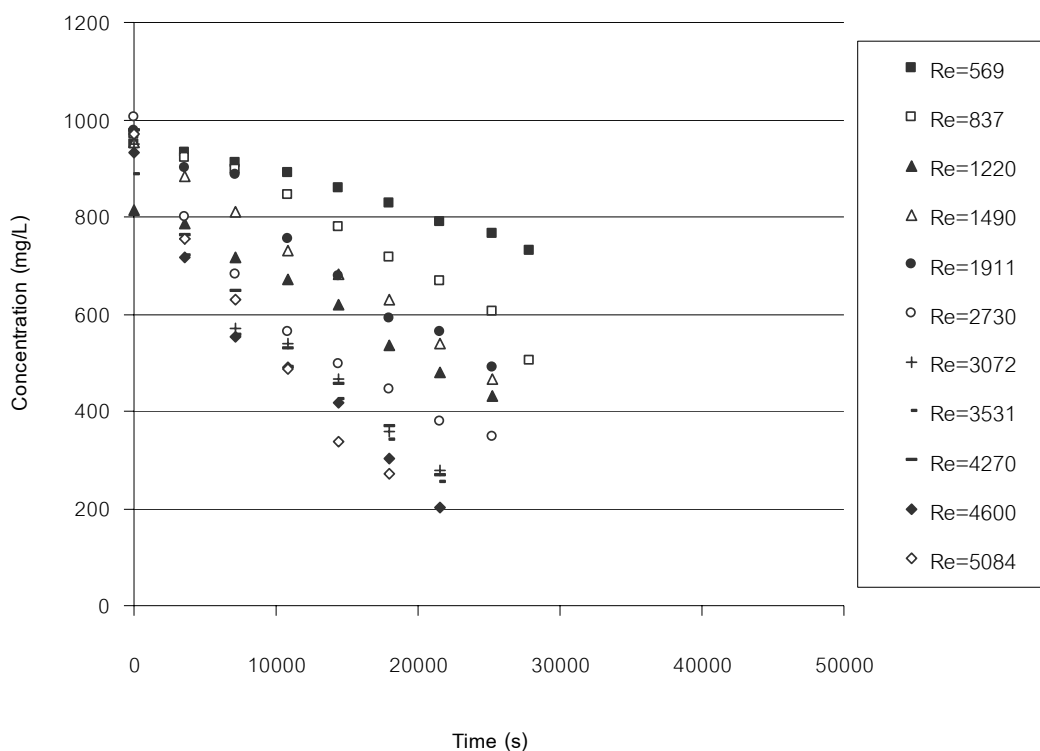
ภาพประกอบ 7 แสดงความเข้มข้นกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับการระเหยของอะซีโตนจากน้ำที่มีการไหลปั่นป่วน ( $Re = 4270$ ) ความเข้มข้นเริ่มต้นของอะซีโตน  $1,000 \text{ mg/l}$  อุณหภูมิของน้ำ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$

## 1.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOCs กับเวลา

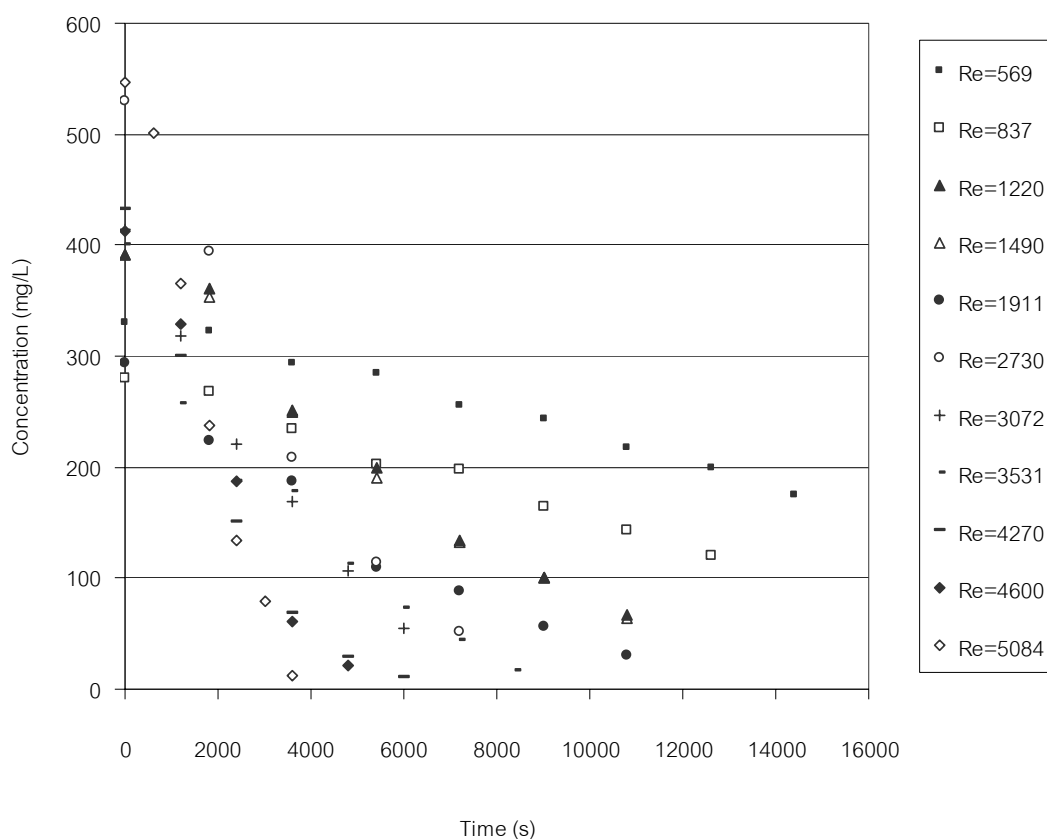
พิจารณาการระเหยของ VOCs จากรางเปิดที่แสดงด้วยขอบเขตของระบบดังภาพประกอบ 8 เนื่องจาก Tank 1 และ Tank 2 เป็นระบบปิด การระเหยส่วนใหญ่เกิดขึ้นเฉพาะในรางเปิด (จรัญ บุญกาญจน์ และคณะ, 2544) เมื่อพิจารณาความเข้มข้นเฉลี่ยของ VOCs ที่เวลาใดๆ ที่ศึกษาพบว่ากราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลามีลักษณะดังภาพประกอบ 9 และ 10 สำหรับ VOCs ที่ควบคุมโดยฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวตามลำดับ



ภาพประกอบ 8 แสดงขอบเขตของระบบสำหรับการระเหยของ VOCs จากน้ำ



ภาพประกอบ 9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา สำหรับการระเหยของเมทานอล จากน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$  และ  $Re = 0-5,084$

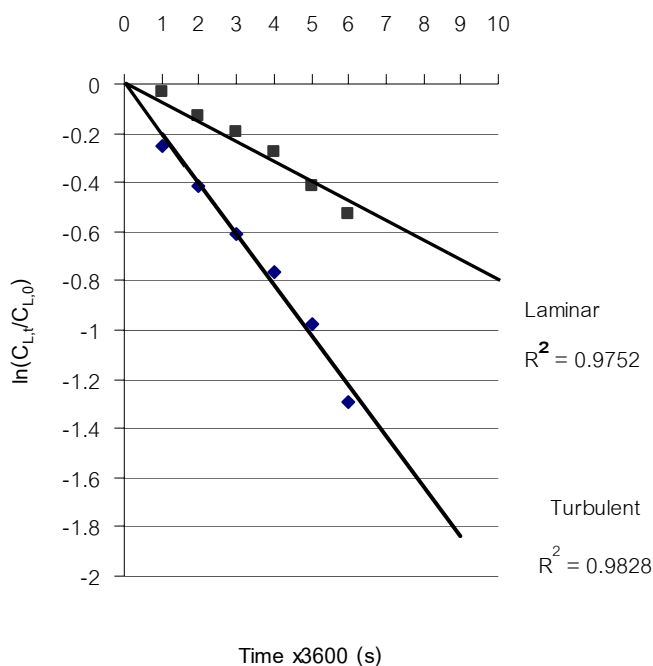


ภาพประกอบ 10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา สำหรับการระเหยของโทลูอิน จากน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$  และ  $Re = 0-5,084$

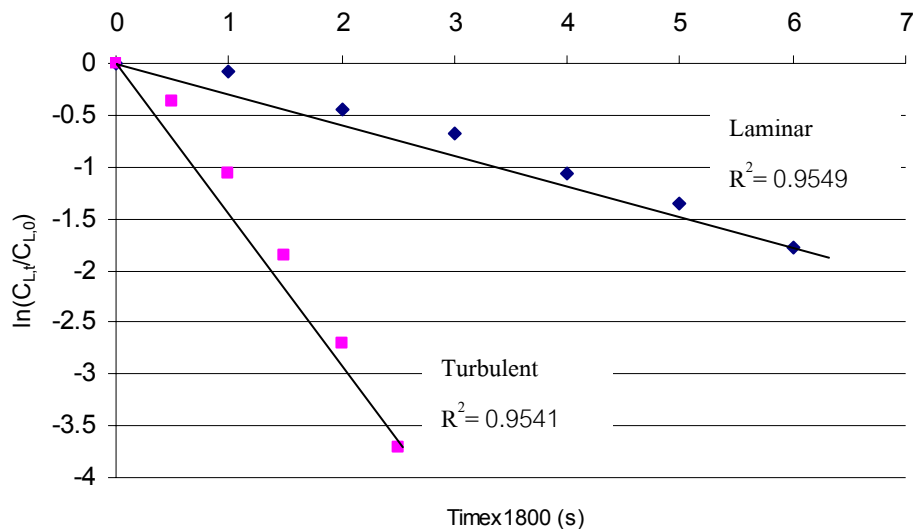
จากภาพประกอบ 9 ถึง 10 ซึ่งแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ของเมทานอลและโทลูอินตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของ VOCs จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วในการไหลมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ความเร็วในการไหลที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนในชั้นน้ำและบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคแก๊ส เป็นผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวและฟิล์มแก๊สลดลง นอกจากนั้นแล้วความปั่นป่วนบริเวณผิวสัมผัสยังทำให้พื้นที่ผิวในการระเหยเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้เร็วขึ้น ดังนั้นอัตราการระเหยของ VOCs จึงเร็วขึ้นตามความเร็วของการไหล ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลาของ VOCs อื่นๆ ที่ศึกษาพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับของเมทานอลและโทลูอิน ดังแสดงในภาพประกอบ 32 - 35 ในภาคผนวก ง

### 1.3 ผลของความเร็วในการไหลต่อค่า $K_{OL} a$

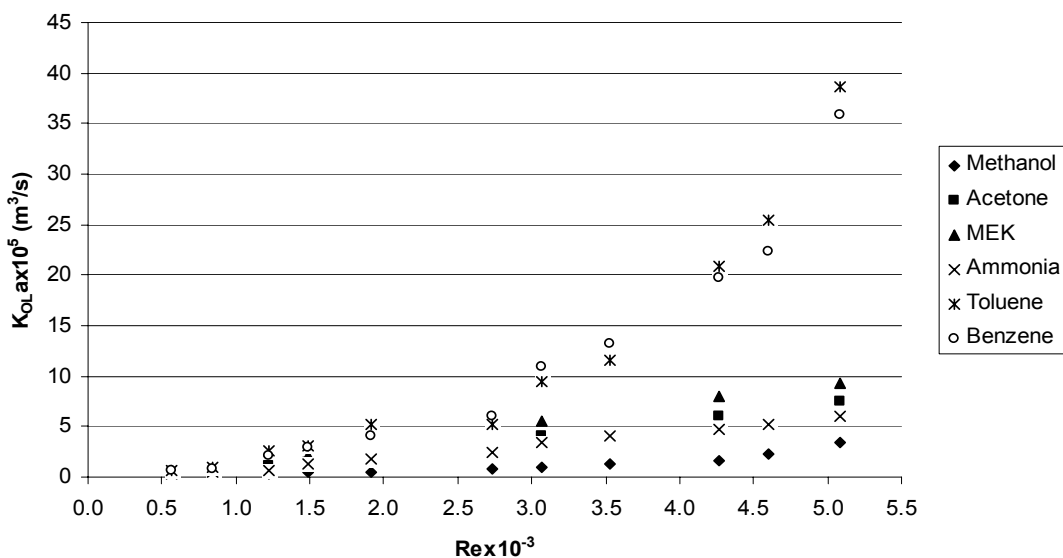
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร ( $K_{OL} a$ ) สำหรับการระเหยของ VOCs ใดๆจากแหล่งน้ำ สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่าง  $\ln(C_{L,t} / C_{L,0})$  กับ  $t$  ตามสมการ (1.14) ถึง (1.15) ซึ่งลักษณะทั่วไปของกราฟ  $\ln(C_{L,t} / C_{L,0})$  กับ  $t$  ของ VOCs แสดงได้ดังภาพประกอบ 11 และ ภาพประกอบ 12 สำหรับ VOCs ที่ควบคุมด้วยฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวตามลำดับ จากสมการ (1.15) ค่า  $K_{OL} a$  ของ VOCs มีค่าเท่ากับความชันของกราฟคูณด้วยปริมาตรน้ำที่ใช้ทดลอง ข้อมูลของ  $K_{OL} a$  สำหรับ VOCs ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองทั้งหมดในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 0 - 5,084 และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2$  °C ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง และความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL} a$  ของ VOCs ต่างๆ กับตัวเลขเรย์โนลด์แสดงดังภาพประกอบ 13 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL} a$  ของ VOCs กับตัวเลขเรย์โนลด์ของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำและ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูงแสดงดังภาพประกอบ 14 และภาพประกอบ 15 ตามลำดับ



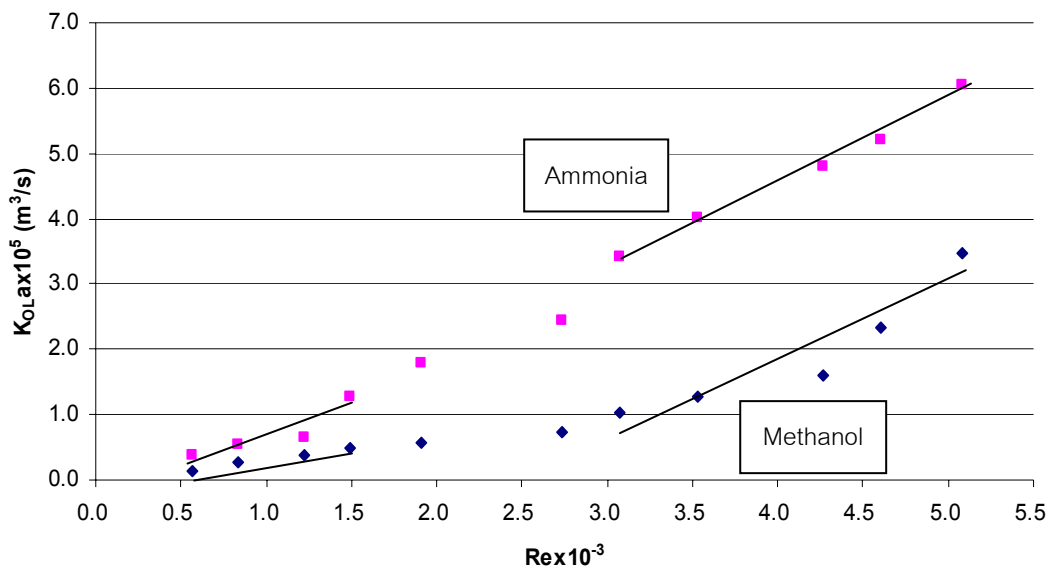
ภาพประกอบ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_{L,t} / C_{L,0})$  กับ  $t$  สำหรับกระบวนการระเหยของเมทานอลจากน้ำ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2$  °C และความเร็วในการไหล อยู่ในช่วง Laminar ( $Re=1220$ ) และ turbulent ( $Re= 4270$ )



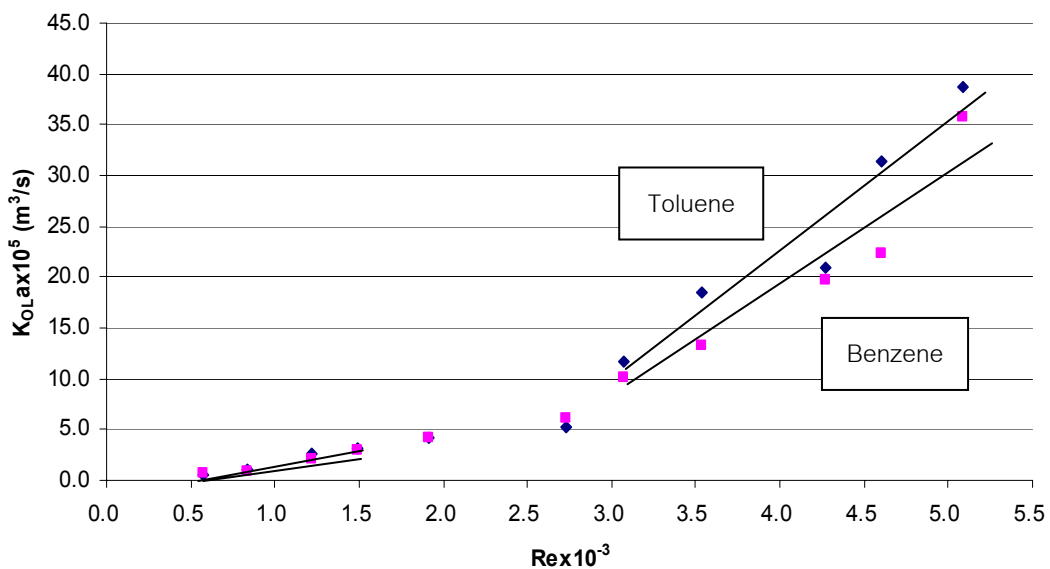
ภาพประกอบ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_{L,t}/C_{L,0})$  กับ  $t$  สำหรับกระบวนการระเหยของโทลูอีนจากน้ำ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2$  °C และความเร็วในการไหลอยู่ในช่วง laminar ( $Re= 1220$ ) และ turbulent ( $Re= 4270$ )



ภาพประกอบ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL}a$  กับ  $Re$  สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs จากน้ำ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2$  °C



ภาพประกอบ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL} a$  กับ  $Re$  สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs ที่มีค่าเฮนรี่ต่ำ (เมทานอลและแอมโมเนีย) จากน้ำ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2$  °C และ  $Re$  ตั้งแต่ 0-5,084



ภาพประกอบ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL} a$  กับ  $Re$  สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs ที่มีค่าเฮนรี่สูง (โทลูอินและเบนซีน) จากน้ำ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2$  °C และ  $Re$  ตั้งแต่ 0-5,084

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL}a$  กับ  $Re$  สำหรับ VOCs ต่างๆ ที่แสดงในภาพประกอบ 13 จะเห็นได้ว่าค่า  $K_{OL}a$  ของ VOCs เหล่านี้ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อ  $Re$  มีค่าต่ำๆ เนื่องจากในช่วงนี้การไหลเป็นแบบราบเรียบซึ่งไม่มีความปั่นป่วนในชั้นน้ำและที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นน้ำกับอากาศทำให้อัตราการระเหยของ VOCs ต่ำ แต่เมื่อความเร็วในการไหลมีค่าสูงขึ้นความปั่นป่วนในชั้นน้ำและที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศก็เพิ่มขึ้นตามซึ่งเป็นผลให้อัตราการระเหยของ VOCs สูงขึ้น ดังนั้น จึงทำให้ค่า  $K_{OL}a$  ของ VOCs เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนกว่าในช่วงแรก

จากภาพประกอบ 14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL}a$  กับ  $Re$  สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs ต่างๆ ที่มีค่าเฮนรีต่ำ คือ เมทานอลและแอมโมเนีย จากภาพประกอบ 14 จะพบว่าค่า  $K_{OL}a$  ของเมทานอลและของแอมโมเนียค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อ  $Re$  มีค่าต่ำๆ เนื่องจากการระเหยของเมทานอลจากน้ำนั้นถูกควบคุมโดยฟิล์มในวัฏภาคแก๊สเป็นหลัก ดังนั้นที่ความเร็วในการไหลมีค่าน้อยซึ่งเป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบส่งผลให้ความปั่นป่วนในวัฏภาคแก๊สน้อย การระเหยของเมทานอลจึงเป็นไปอย่างช้าๆ และเมื่อความเร็วในการไหลมีค่ามากขึ้นจนเข้าสู่ระดับการไหลแบบปั่นป่วนจะพบว่าค่า  $K_{OL}a$  ของเมทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนนั้นทำให้พื้นที่ผิวในการระเหยเพิ่มขึ้นและจากสภาพความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นยังสามารถทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มแก๊สที่อยู่ติดกับฟิล์มของเหลวลดลงจึงทำให้เมทานอลสามารถระเหยจากน้ำได้มากขึ้นส่งผลให้ค่า  $K_{OL}a$  ของเมทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับช่วงแรก

จากภาพประกอบ 15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL}a$  กับ  $Re$  สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs ที่มีค่าเฮนรีสูงคือ โทลูอินและเบนซีน จากภาพประกอบ 15 พบว่าค่า  $K_{OL}a$  ของโทลูอินและเบนซีนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงที่  $Re$  มีค่าต่ำๆ หรือการไหลเป็นแบบราบเรียบ และค่า  $K_{OL}a$  ของโทลูอินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วในการไหลมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการระเหยของโทลูอินถูกควบคุมโดยชั้นฟิล์มของของเหลว ดังนั้นอัตราการระเหยจึงขึ้นอยู่กับระดับความปั่นป่วนในของเหลวเป็นหลัก การเพิ่มความเร็วในการไหลจึงทำให้มีความปั่นป่วนในอนุภาคของเหลวมากขึ้นและความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นการเพิ่มผิวสัมผัสการระเหยของโทลูอินให้มากขึ้นทำให้ค่า  $K_{OL}a$  ของโทลูอินสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

การเปลี่ยนแปลงความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{OL}a$  กับ  $Re$  ทั้งในกรณีของ VOCs ที่ควบคุมโดยฟิล์มแก๊สและของ VOCs ที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลวมีความสอดคล้องกับทฤษฎี คือ ที่  $Re$  มีค่าน้อยกว่า 1900 การไหลนั้นถูกจัดเป็นการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าพิกัดที่ไหลในรางเปิดมีลักษณะราบเรียบจริงแต่ที่  $Re$  มากกว่า 2800 ซึ่งเป็นการ



ไหลแบบปั่นป่วนผิวน้ำจะมีลักษณะเป็นคลื่น พบว่าที่ระดับการไหลนี้ทำให้ค่า  $K_{OL}a$  ของทั้งเมทานอลและโทลูอินมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของ  $K_{OL}a$  ที่ Re ต่ำกว่า 2800

สำหรับ VOCs ที่การระเหยถูกควบคุมโดยทั้งสองวัฏภาคนั้นพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า  $K_{OL}a$  ต่อค่า Re นั้น อยู่ระหว่างค่า  $K_{OL}a$  ของเมทานอลและโทลูอิน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 13 ซึ่งค่า  $K_{OL}a$  ของ VOCs ที่ศึกษานั้นจะมีแนวโน้มใกล้เคียงเมทานอลหรือโทลูอินนั้นขึ้นอยู่กับว่า VOCs ชนิดนั้นถูกควบคุมโดยวัฏภาคไหนมากกว่ากันเช่น แอมโมเนีย ซึ่งการระเหยนั้นถูกควบคุมโดยฟิล์มในวัฏภาคแก๊สมากกว่าในวัฏภาคของเหลวจึงทำให้ค่า  $K_{OL}a$  ของแอมโมเนีย ใกล้เคียงกับของเมทานอล ส่วนเบนซีนการระเหยถูกควบคุมโดยวัฏภาคของเหลวมากกว่าในวัฏภาคแก๊สดังนั้นค่า  $K_{OL}a$  ของเบนซีนจึงมีความใกล้เคียงกับของโทลูอิน ส่วนค่า  $K_{OL}a$  ของ VOCs อื่นๆ จะเพิ่มขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้นดังภาพประกอบ 13 และพบว่าที่ Re เดียวกัน ค่า  $K_{OL}a$  ของโทลูอิน  $>$   $K_{OL}a$  ของเบนซีน  $>$   $K_{OL}a$  ของ MEK  $>$   $K_{OL}a$  ของอะซีโตน  $>$   $K_{OL}a$  ของแอมโมเนีย  $>$   $K_{OL}a$  ของเมทานอล

## 2. ผลของความเร็วในการไหลต่อค่า $k_La$ และ $k_Ga$

### 2.1 ผลของความเร็วในการไหลต่อค่า $k_La$ ของโทลูอิน

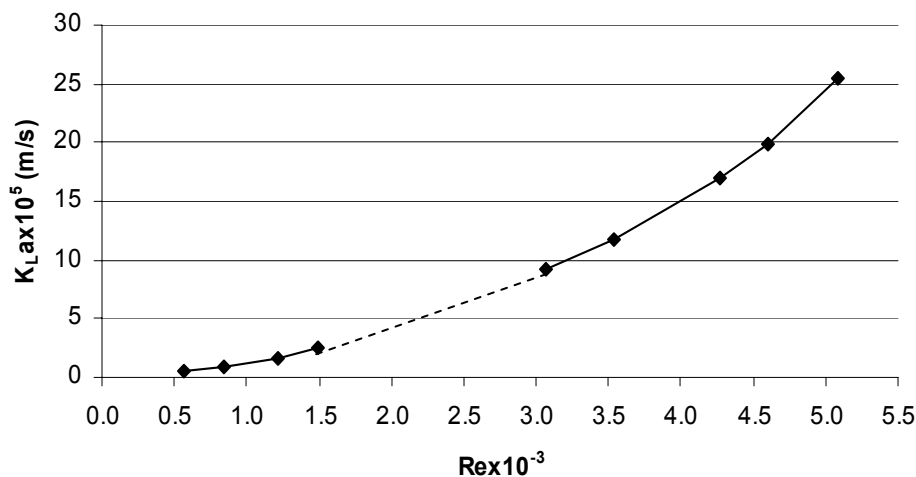
ค่า  $k_La$  สามารถคำนวณได้จากกระบวนการระเหยของโทลูอินจากแหล่งน้ำตามสมการ (1.17) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_La$  ของโทลูอินกับ Re แสดงได้ดังภาพประกอบ 16 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_La$  กับ Re ได้โดยแบ่งความสัมพันธ์ออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงการไหลแบบราบเรียบ ( $Re = 0-1900$ ) และช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re > 2800$ ) แสดงได้ดังสมการ(3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$k_La(\text{toluene}) = 2 \times 10^{-6} e^{(0.0017 \text{ Re})} \quad (3.1)$$

สำหรับ  $Re = 0-1,900$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ \text{C}$

$$k_La(\text{toluene}) = 2 \times 10^{-5} e^{(0.0005 \text{ Re})} \quad (3.2)$$

สำหรับ  $Re > 2,800$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ \text{C}$



ภาพประกอบ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_L a$  ของโกลูอินกับ  $Re$  ( $Re = 0-5,084$  และ อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ C$ )

จากภาพประกอบ 16 พบว่าที่  $Re$  อยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ค่า  $k_L a$  ของโกลูอินจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อ  $Re$  อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่า  $k_L a$  ของโกลูอินจะเพิ่มอย่างรวดเร็วเนื่องจากสภาวะความปั่นป่วนเป็นการเพิ่มการระเหยของโกลูอินให้มากขึ้นดังได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

## 2.2 ผลของความเร็วในการไหลต่อค่า $k_G a$ ของเมทานอล

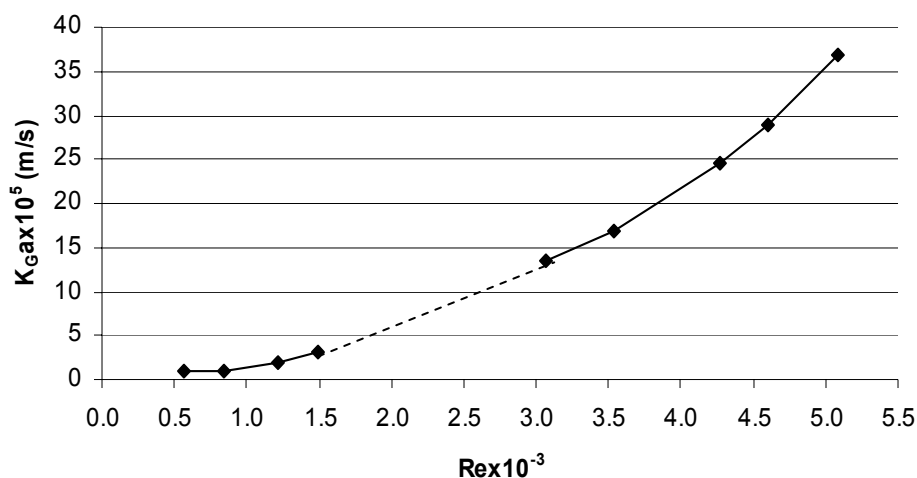
ค่า  $k_G a$  สามารถคำนวณได้จากกระบวนการระเหยของเมทานอลจากแหล่งน้ำตามสมการ (1.19) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_G a$  ของเมทานอลกับ  $Re$  ในช่วง  $0 - 5084.4$  และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ C$  แสดงในภาพประกอบ 17 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_G a$  กับ  $Re$  โดยแบ่งช่วงความเร็วในการไหลเป็นสองช่วง คือ ช่วงการไหลแบบราบเรียบ ( $Re = 0-1900$ ) และช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re > 2800$ ) แสดงได้ดังสมการ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$k_G a(\text{methanol}) = 0.004e^{(0.0012 Re)} \quad (3.3)$$

สำหรับ  $Re = 0-1,900$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ C$

$$k_G a(\text{methanol}) = 0.028e^{(0.0002 Re)} \quad (3.4)$$

สำหรับ  $Re > 2,800$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ C$



ภาพประกอบ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_G a$  ของเมทานอลกับ  $Re$  ( $Re = 0-5,084$  และ อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ C$ )

จากภาพประกอบ 17 พบว่าที่  $Re$  อยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ค่า  $k_G a$  ของเมทานอลจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เช่นกันแต่เมื่อ  $Re$  อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่า  $k_G a$  ของเมทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากความเร็วในการไหลมากขึ้นทำให้มีความปั่นป่วนมากขึ้นช่วยให้มีการระเหยของเมทานอลเพิ่มสูงขึ้นดังได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

### 3. สมการเอ็มพีริคัลของ $k_L a$ และ $k_G a$ สำหรับการระเหยของ VOCs จากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด

สมการเอ็มพีริคัลของ  $k_L a$  และ  $k_G a$  สำหรับ VOCs ใดๆ ได้จากการปรับแก้สมการ  $k_L a$  และ  $k_G a$  ของโทลูอินและของเมทานอลโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการ (1.23) และ (1.24) สำหรับ  $k_L a$  และ  $k_G a$  ตามลำดับดังนี้

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสำหรับ VOCs ใดๆ คือ

$$k_L a_{(VOC)} = 2 \times 10^{-6} e^{(0.0017 \text{ Re})} \left( \frac{D_{VOC-liq}}{D_{toluene-liq}} \right)^n \quad (3.5)$$

สำหรับ  $\text{Re} = 0-1,900$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ\text{C}$

$$k_L a_{(VOC)} = 2 \times 10^{-5} e^{(0.0005 \text{ Re})} \left( \frac{D_{VOC-liq}}{D_{toluene-liq}} \right)^n \quad (3.6)$$

สำหรับ  $\text{Re} > 2,800$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ\text{C}$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับ VOCs ใดๆ คือ

$$k_G a_{(VOC)} = 0.004 e^{(0.0012 \text{ Re})} \left( \frac{D_{VOC-air}}{D_{methanol-air}} \right)^n \quad (3.7)$$

สำหรับ  $\text{Re} = 0-1,900$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ\text{C}$

$$k_G a_{(VOC)} = 0.028 e^{(0.0002 \text{ Re})} \left( \frac{D_{VOC-air}}{D_{methanol-air}} \right)^n \quad (3.8)$$

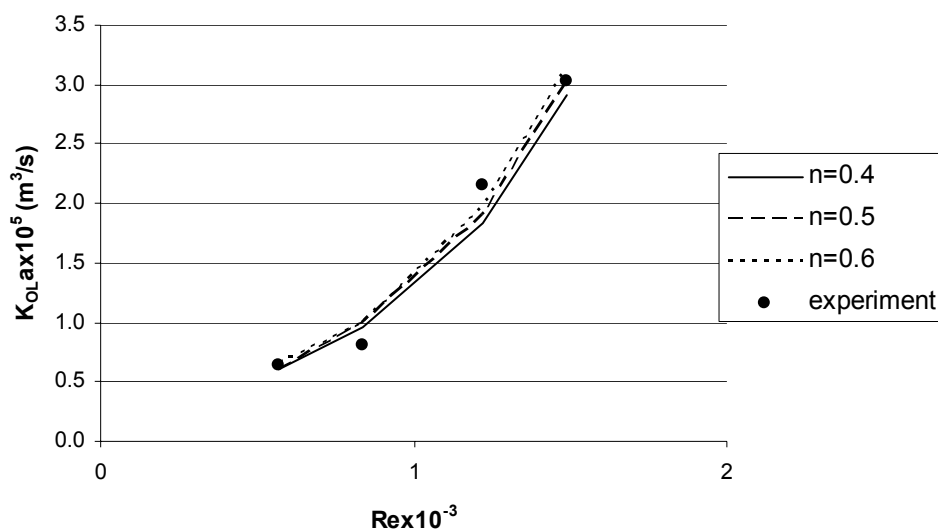
สำหรับ  $\text{Re} > 2,800$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ\text{C}$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้และสถานะของการผสมในระบบที่พิจารณา ในการศึกษานี้ได้ทำนายค่า  $n$  โดยใช้สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวมาพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม  $K_{OL} a$  ของ VOCs และหาค่า  $n$  ที่ให้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด จากนั้นจึงพิจารณาว่าค่า  $n$  ค่าใดที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทำนายค่า  $K_{OL} a$  มากที่สุด

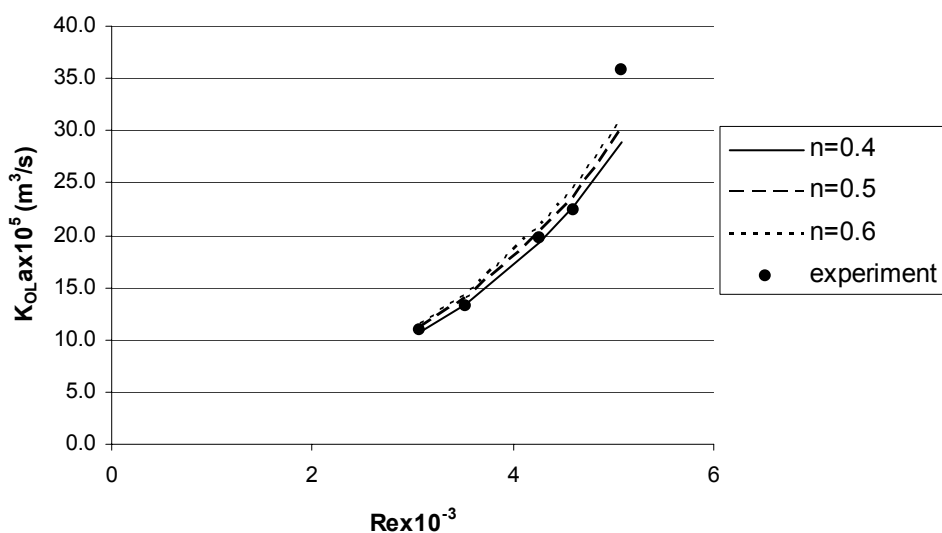
#### 4. การเปรียบเทียบ $K_{OL} a$ ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลกับผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณ  $K_{OL} a$  ของ VOCs ใดๆ จากสมการ (1.16) โดยใช้สมการ  $k_G a$  และ  $k_L a$  ตามสมการ (3.5) ถึง (3.8) และทำการเปรียบเทียบระหว่าง  $K_{OL} a$  ที่คำนวณได้กับ  $K_{OL} a$  ที่วัดได้โดยตรงจากกระบวนการระเหยของ เบนซีน อะซีโตน MEK และแอมโมเนีย เพื่อหาค่า  $n$  ที่ทำให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง ผลการคำนวณ  $K_{OL} a$  เทียบกับค่าที่ได้

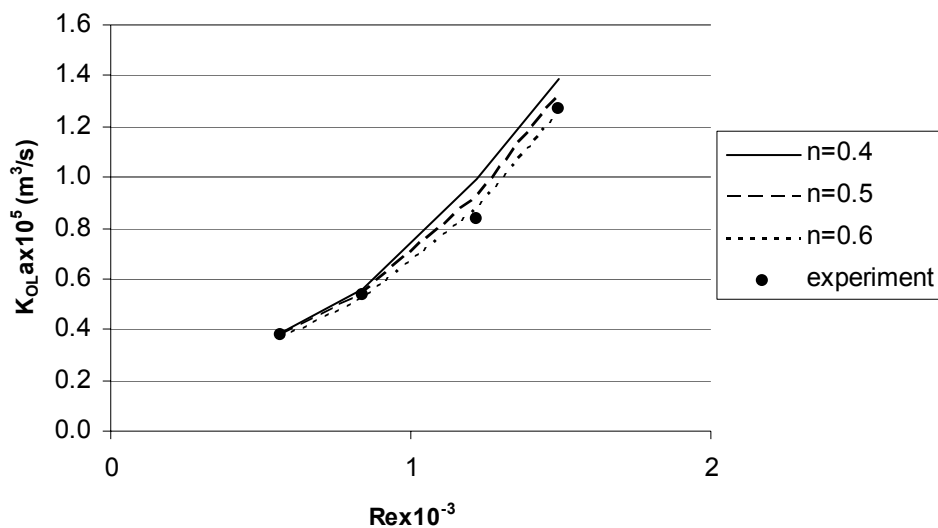
จากการทดลอง ที่  $n$  ต่างๆ สำหรับเบนซีน อะซีโตน MEK และแอมโมเนีย แสดงในภาพประกอบ 18 ถึง ภาพประกอบ 25



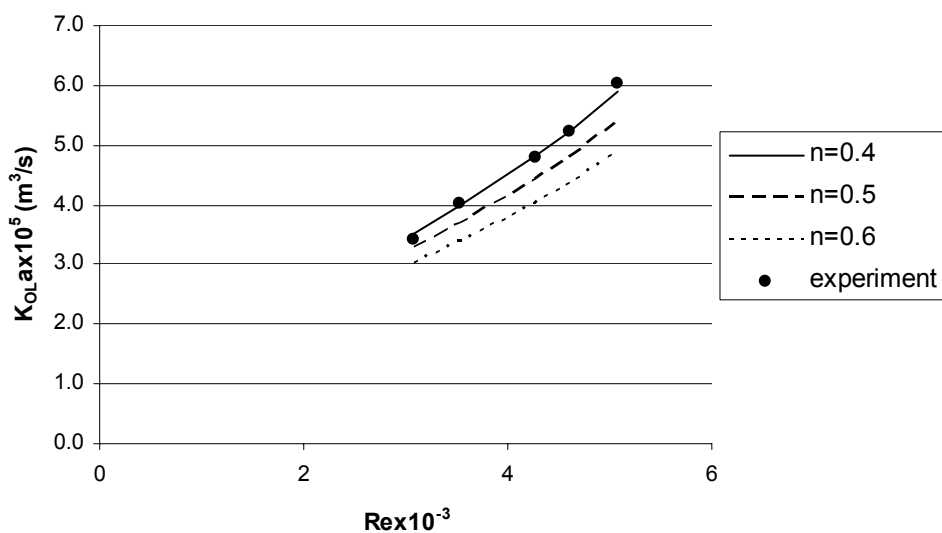
ภาพประกอบ 18 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของเบนซีนจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบราบเรียบ ( $Re = 0-1,900$ ) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$



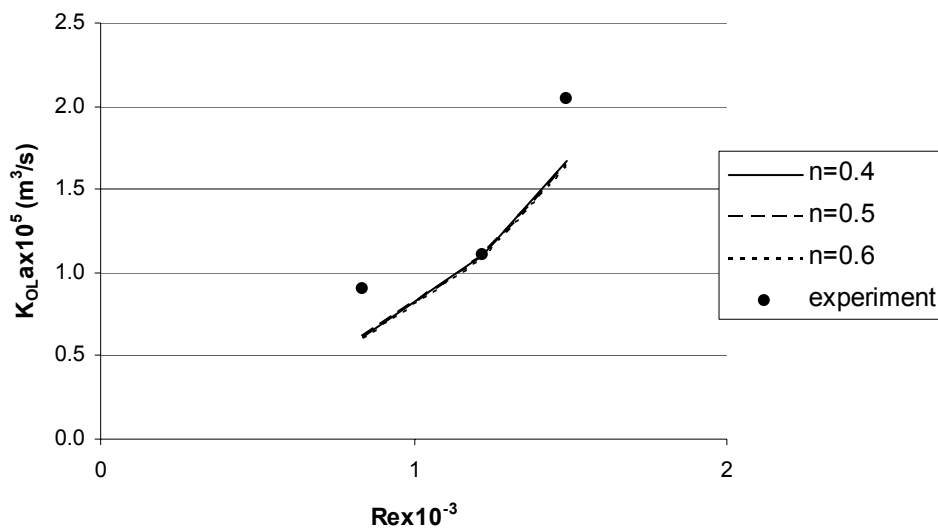
ภาพประกอบ 19 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของเบนซีนจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re > 2,800$ ) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$



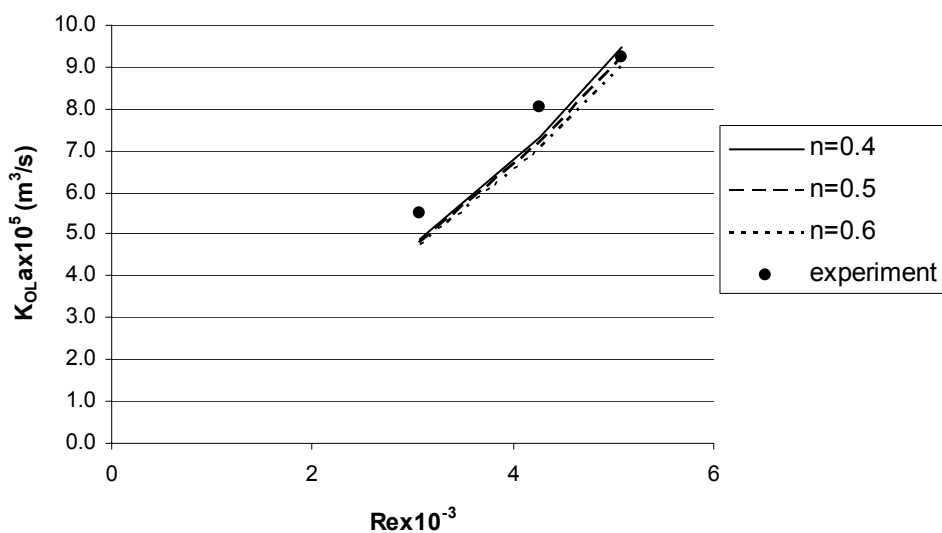
ภาพประกอบ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบราบเรียบ ( $Re= 0-1,900$ )และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27\pm 2^{\circ}C$



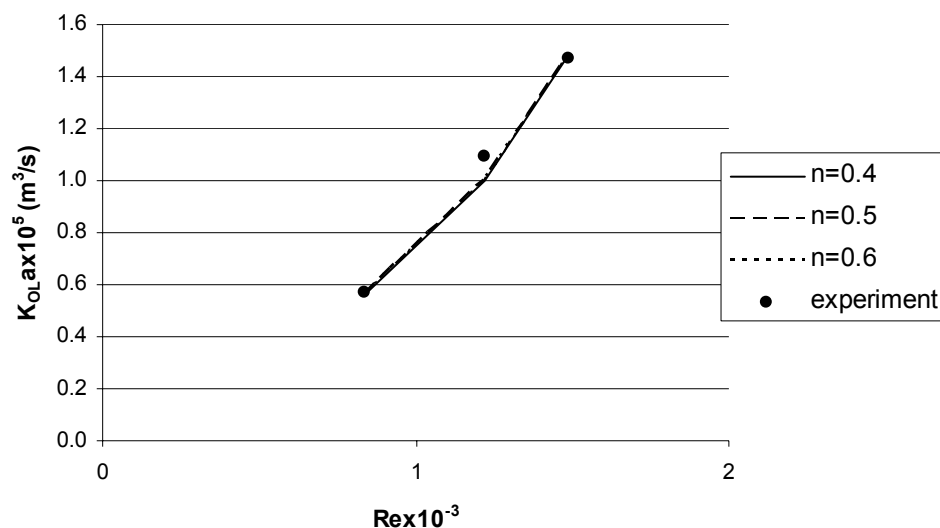
ภาพประกอบ 21 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re > 2,800$ )และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27\pm 2^{\circ}C$



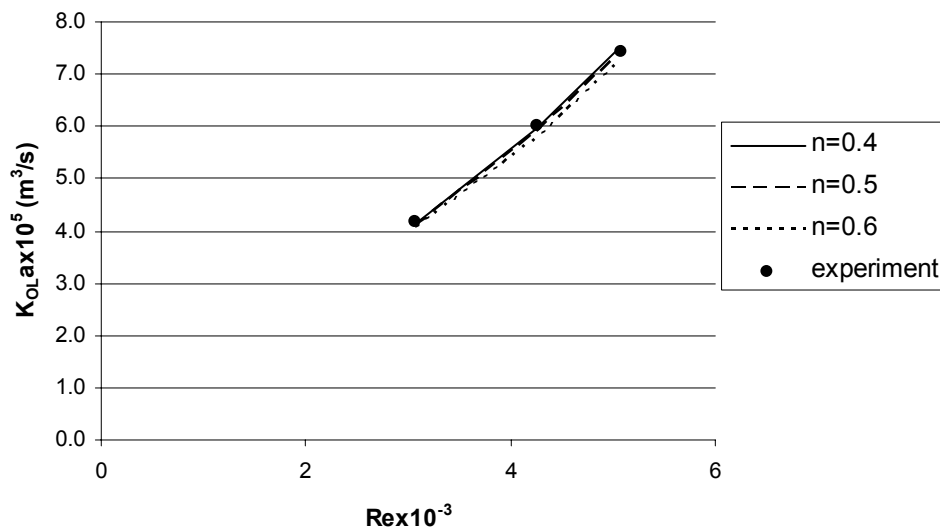
ภาพประกอบ 22 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของ MEK จากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบราบเรียบ ( $Re= 0-1,900$ )และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^{\circ}C$



ภาพประกอบ 23 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของ MEK จากแหล่งน้ำจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re > 2,800$ )และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^{\circ}C$



ภาพประกอบ 24 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพริรัคัลสำหรับการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบราบเรียบ ( $Re = 0-1,900$ ) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$



ภาพประกอบ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $K_{OL} a$  จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพริรัคัลสำหรับการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re > 2,800$ ) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$



จากข้อมูลข้างต้น พบว่าค่า  $K_{ol}a$  ของ VOCs ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลที่ (3.5) ถึง (3.8) ที่การไหลในช่วงราบเรียบ ค่า  $n = 0.4, 0.5, 0.6$  ให้ค่าจากการทำนายใกล้เคียงกันแต่ที่ค่า  $n = 0.5$  ให้ค่าสอดคล้องกับการทดลองมากที่สุดและที่การไหลในช่วงปั่นป่วนค่า  $n = 0.4$  ให้ค่าการทำนายสอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับสภาวะการผสม (Chu-Chin *et al.*, 1993) โดยค่า  $n$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 สำหรับสภาวะการผสมที่ดี ถึง  $n$  เท่ากับ 1.0 สำหรับสภาวะที่มีการผสมต่ำ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่สภาวะการผสมที่ด้นั้นจะมีค่า  $n$  ที่ต่ำกว่าในสภาวะการผสมที่ไม่ดีหรือสภาวะการผสมต่ำ ในการทดลองนี้ที่สภาวะการไหลแบบราบเรียบนั้นสามารถกล่าวได้ว่าเป็นสภาวะที่มีการผสมต่ำและที่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนนั้นอนุภาคของของเหลวสามารถผสมกันได้ดีจึงเป็นสภาวะการผสมที่ดี ดังนั้นสามารถแสดงได้ว่า

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสำหรับ VOCs ใดๆ คือ

$$k_L a_{(VOC)} = 2 \times 10^{-6} e^{(0.0017 Re)} \left( \frac{D_{VOC-liq}}{D_{toluene-liq}} \right)^{0.5} \quad (3.9)$$

สำหรับ  $Re = 0-1,900$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ C$

$$k_L a_{(VOC)} = 2 \times 10^{-5} e^{(0.0005 Re)} \left( \frac{D_{VOC-liq}}{D_{toluene-liq}} \right)^{0.4} \quad (3.10)$$

สำหรับ  $Re > 2,800$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ C$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับ VOCs ใดๆ คือ

$$k_G a_{(VOC)} = 0.004 e^{(0.0012 Re)} \left( \frac{D_{VOC-air}}{D_{methanol-air}} \right)^{0.5} \quad (3.11)$$

สำหรับ  $Re = 0-1,900$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ C$

$$k_G a_{(VOC)} = 0.028 e^{(0.0002 Re)} \left( \frac{D_{VOC-air}}{D_{methanol-air}} \right)^{0.4} \quad (3.12)$$

สำหรับ  $Re > 2,800$  และ  $T = 27 \pm 2^\circ C$

## 5. การเปรียบเทียบค่า $k_L$ ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลจากผลการทดลองนี้กับค่า $k_L$ ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลจากระบบอื่นที่ใกล้เคียงกัน

จากสมการ (3.9) ถึง (3.12) ซึ่งถือว่าเป็นสมการเอ็มพิริคัลที่ได้พัฒนาขึ้นจากการทดลองนี้ นอกจากจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้ด้วยการนำไปทำนายค่า  $K_{OL}$  ของ VOCs อื่นๆ เทียบกับผลการทดลองจริงแล้ว จะทำการเปรียบเทียบค่าการทำนายกับสมการเอ็มพิริคัลอื่นๆ ที่ระบบมีความใกล้เคียงกับการทดลอง เช่น เป็นลักษณะการไหลในช่องทางเปิดหรือมีการไหลแบบในแม่น้ำ เป็นต้น จากการตรวจเอกสารข้างต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล สำหรับการระเหยของ VOCs ใดๆ จากกระแสน้ำและแหล่งน้ำที่มีลักษณะการไหลจากที่หนึ่งไปสู่ที่หนึ่งนั้น โดยมากมักมีสมการเอ็มพิริคัลที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลวทั้งนี้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสแก๊สนั้นได้รับความสนใจน้อยมาก (Kozeil *et al.*, 2001) ซึ่งสมการเอ็มพิริคัลสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลวของ VOCs ใดๆ ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายค่าการระเหยจากการไหลในแหล่งน้ำสามารถหาได้จากสมการของ Owen (1964) ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นให้ใช้ได้กับ stream และ river ดังนี้

$$k_{L(VOC)} = 0.000946 \left( \frac{D_{VOC-liq}}{D_{Ox-liq}} \right)^n \gamma U_{liq}^{0.67} d^{0.85} \quad (3.13)$$

- เมื่อ  $k_{L(VOC)}$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลว (m/s)  
 $D_{VOC-l}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของVOC ในเฟสของเหลว(m<sup>2</sup>/s)  
 $D_{Ox-l}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ O<sub>2</sub> ในเฟสของเหลว(m<sup>2</sup>/s)  
 $\gamma$  = empirical temperature correction correction factor  
 (=  $1.024^{T_{liq} - 20}$ ) ,  $T_{liq}$  คือ อุณหภูมิของของเหลว (°C)  
 $U_{liq}$  = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลว(m/s)  
 $d$  = ความลึกไฮดรอลิกของการไหลเฉลี่ย(m)  
 $n$  = 1.0

ซึ่งจะพบว่าสมการของ Owen นั้น เป็นสมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลว ( $k_L$ ) แต่สมการเอ็มพิริคัลที่ได้จากการทดลองนี้ คือสมการ (3.9) และ (3.10)

นั้นใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรในเฟสของเหลว ( $k_L a$ ) ดังนั้นในการคำนวณค่า  $k_L$  จากสมการ (3.9) ถึง (3.10) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการของ Owen จึงใช้ค่าพื้นที่ผิวสำหรับการระเหยเฉลี่ย ( $a$ ) เท่ากับ  $4.5 \text{ m}^2$  ผลการคำนวณที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตาราง 2 แสดงผลการคำนวณค่า  $k_L$  ของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงและต่ำจากสมการของ Owen และจากการทดลอง

2.1 แสดงผลการคำนวณค่า  $k_L$  ของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำ จากสมการของ Owen และจากการทดลอง

Re	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลว( $k_L$ ) ของ		$\frac{k_L(\text{study})}{k_L(\text{Owen})}$
	แอมโมเนีย (m/s)		
	จากการศึกษา	จากสมการของ Owen	
569	$2.08 \times 10^{-6}$	$6.21 \times 10^{-6}$	0.33
837	$3.28 \times 10^{-6}$	$8.64 \times 10^{-6}$	0.38
1220	$6.29 \times 10^{-6}$	$1.20 \times 10^{-5}$	0.52
1490	$9.95 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-5}$	0.69
3072	$3.26 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-5}$	1.15
3531	$4.11 \times 10^{-5}$	$3.19 \times 10^{-5}$	1.28
4270	$5.95 \times 10^{-5}$	$3.56 \times 10^{-5}$	1.67
4600	$7.02 \times 10^{-5}$	$5.44 \times 10^{-5}$	1.29
5084	$8.95 \times 10^{-4}$	$7.03 \times 10^{-5}$	1.27

2.2 แสดงผลการคำนวณค่า  $k_L$  ของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำ จากสมการของ Owen และจากการทดลอง(ต่อ)

Re	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลว( $k_L$ ) ของ		$\frac{k_L(\text{study})}{k_L(\text{Owen})}$
	เมทานอล (m/s)		
	จากการศึกษา	จากสมการของ Owen	
569	$1.49 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	1.45
837	$2.36 \times 10^{-6}$	$1.42 \times 10^{-6}$	1.66
1220	$4.53 \times 10^{-6}$	$1.99 \times 10^{-6}$	2.27
1490	$7.17 \times 10^{-6}$	$2.37 \times 10^{-6}$	3.02
3072	$2.99 \times 10^{-5}$	$4.70 \times 10^{-6}$	6.36
3531	$3.76 \times 10^{-5}$	$5.28 \times 10^{-6}$	7.11
4270	$5.45 \times 10^{-5}$	$6.20 \times 10^{-6}$	8.79
4600	$6.42 \times 10^{-5}$	$6.66 \times 10^{-6}$	9.72
5084	$8.18 \times 10^{-5}$	$7.34 \times 10^{-6}$	9.85

2.3 แสดงผลการคำนวณค่า  $k_L$  ของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง จากสมการของ Owen และจากการทดลอง

Re	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลว( $k_L$ ) ของ		$\frac{k_L(\text{study})}{k_L(\text{Owen})}$
	เบนซีน (m/s)		
	จากการศึกษานี้	จากสมการของ Owen	
569	$2.03 \times 10^{-6}$	$2.83 \times 10^{-6}$	0.71
837	$2.21 \times 10^{-6}$	$3.94 \times 10^{-6}$	0.56
1220	$4.25 \times 10^{-6}$	$5.50 \times 10^{-6}$	0.72
1490	$6.78 \times 10^{-6}$	$6.57 \times 10^{-6}$	1.02
3072	$2.39 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-5}$	1.83
3531	$3.00 \times 10^{-5}$	$1.46 \times 10^{-5}$	2.05
4270	$4.35 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-5}$	2.54
4600	$5.13 \times 10^{-5}$	$1.84 \times 10^{-5}$	2.78
5084	$6.54 \times 10^{-5}$	$2.02 \times 10^{-5}$	3.23

2.4 แสดงผลการคำนวณค่า  $k_L$  ของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง จากสมการของ Owen และจากการทดลอง (ต่อ)

Re	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสของเหลว( $k_L$ ) ของ		$\frac{k_L(\text{study})}{k_L(\text{Owen})}$
	โทลูอีน (m/s)		
	จากการศึกษานี้	จากสมการของ Owen	
569	$2.17 \times 10^{-6}$	$5.53 \times 10^{-6}$	0.39
837	$2.84 \times 10^{-6}$	$7.69 \times 10^{-6}$	0.36
1220	$3.54 \times 10^{-6}$	$1.07 \times 10^{-5}$	0.32
1490	$5.59 \times 10^{-6}$	$1.28 \times 10^{-5}$	0.43
3072	$2.06 \times 10^{-5}$	$2.53 \times 10^{-5}$	0.81
3531	$2.59 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-5}$	0.91
4270	$3.75 \times 10^{-5}$	$3.34 \times 10^{-5}$	1.12
4600	$4.43 \times 10^{-5}$	$3.58 \times 10^{-5}$	1.23
5084	$5.64 \times 10^{-5}$	$3.95 \times 10^{-5}$	1.42

จากตารางข้างต้นจะเห็นว่าค่า  $k_L$  ที่คำนวณได้จาก สมการเอ็มพิริคัลของ Owen จะมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายนี้แต่ยังคงมีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกัน (Same order of magnitude) ซึ่งถือได้ว่าค่าที่คำนวณได้สามารถยอมรับได้ในระดับหนึ่ง ความแตกต่างอาจจะมาจากระบบการศึกษาไม่เหมือนกันโดยของ Owen ได้จากการศึกษาการถ่ายโอนมวลที่สภาวะจริงในท่อระบายน้ำทิ้งของชุมชน และพัฒนาสมการขึ้นบนพื้นฐานของค่าการแพร่ของออกซิเจนในน้ำทิ้งนั้น เพื่อให้สามารถใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์ในฟิล์มของเหลวได้