

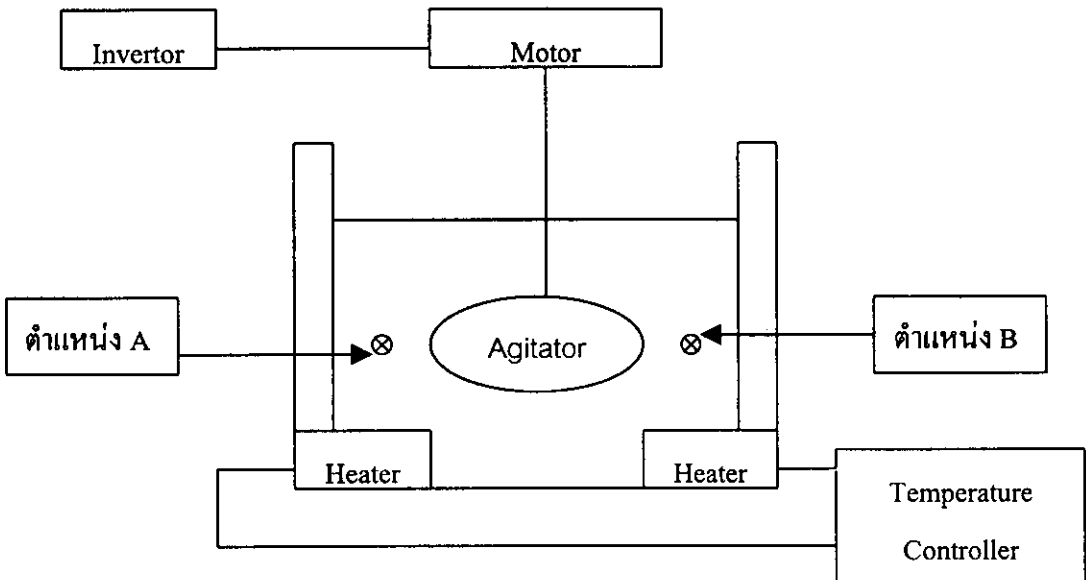
บทที่ 3

ผล และวิจารณ์ผลการทดลอง

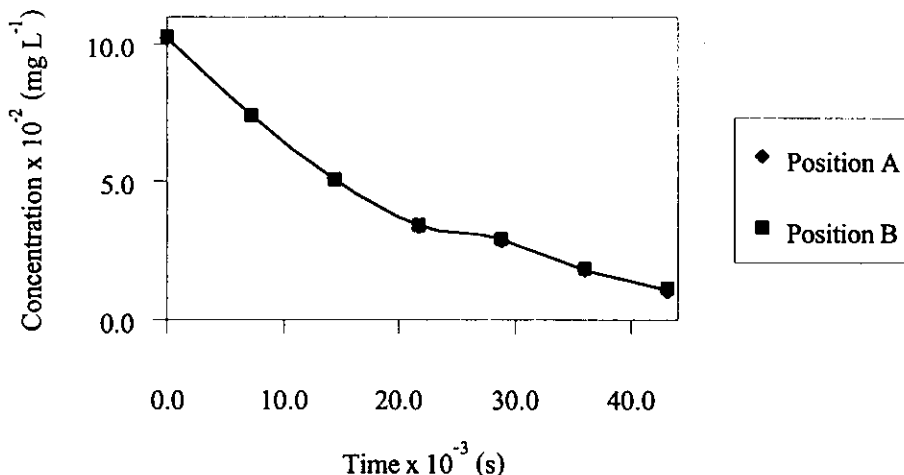
1. ผลของความเร็รรอบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

1.1 ผลของตำแหน่งในของเหลวต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOCs

จากการวัดความเข้มข้นของ VOCs จากน้ำในถังกวนจำลอง ที่ตำแหน่ง A และ B ดังภาพประกอบ 2 พบว่าความเข้มข้นของ VOCs จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ได้รับความระเหยของอะซิโตนจากน้ำที่ความเร็วรอบเท่ากับ 260 rpm และอุณหภูมิของน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 3 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของอะซิโตนที่วัดได้ ณ เวลาใดๆ จากตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีของถังกวน มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้ค่าเฉลี่ยจาก 2 ตำแหน่งเป็นตัวแทนของความเข้มข้นที่เวลานั้น ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยจาก 2 ตำแหน่งที่เวลาต่างๆ แสดงด้วยเส้นทึบในภาพประกอบ 3 และข้อมูลความเข้มข้นของการทดลองอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ข



ภาพประกอบ 2 แสดงตำแหน่งบริเวณเก็บตัวอย่าง



ภาพประกอบ 3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของอะซีโตนที่ตำแหน่งต่างๆภายในถังกวนโดยที่ความเร็วรอบเท่ากับ 260 rpm และที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง (~27 °C)

1.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOCs กับเวลา

มีปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ความเร็วรอบก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำ การทดลองเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายของ VOCs ที่ต้องการศึกษาในน้ำปริมาตร 50 ลิตร ให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการดังตาราง 2 จากนั้นใส่สารละลายดังกล่าวลงในถังกวน แล้วปรับความเร็วรอบให้ได้ตามต้องการ ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOCs กับเวลาที่ได้ศึกษาจากการระเหยของอะซีโตน จากแหล่งน้ำที่ความเร็วรอบต่างๆ แสดงในภาพประกอบ 4 และข้อมูลการระเหยของ อะซีโตน อื่นๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข จากภาพประกอบ 4 จะเห็นว่าความเข้มข้นของ VOCs จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เพราะการกวนจะไปเพิ่มความปั่นป่วนในวัฏภาคของของเหลวและวัฏภาคแก๊ส เป็นผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มของของเหลวและชั้นฟิล์มแก๊สลดลง นอกจากนี้แล้วการกวนทำให้พื้นที่ผิวของการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้เร็วขึ้น อัตราการระเหยของ VOCs จะเร็วขึ้นด้วย

ตาราง 2 สภาวะการทดลอง : ผลของความเร็วยรอบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

2.1 ศึกษาผลของความเร็วยรอบต่ออัตราการระเหยของเมทานอลจากน้ำ

การทดลองที่	ความเร็วยรอบของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทานอลในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้ายของเมทานอลในน้ำ (mg L ⁻¹)
1	0	72000	27 ± 2	1261	1137
2	20	72000	27 ± 2	866	712
3	60	72000	27 ± 2	848	618
4	100	72000	27 ± 2	818	523
5	260	72000	27 ± 2	756	423
6	470	57600	27 ± 2	765	454

2.2 ศึกษาผลของความเร็วยรอบต่ออัตราการระเหยของโทลูอินจากน้ำ

การทดลองที่	ความเร็วยรอบของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโทลูอินในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้ายของโทลูอินในน้ำ (mg L ⁻¹)
7	0	68400	27 ± 2	273	193
8	20	50400	27 ± 2	208	61
9	60	14400	27 ± 2	219	27
10	100	3600	27 ± 2	218	48
11	260	900	27 ± 2	222	44
12	470	480	27 ± 2	239	31

2.3 ศึกษาผลของความเร็วยกต่ออัตราการระเหยของอะซีโตนจากน้ำ

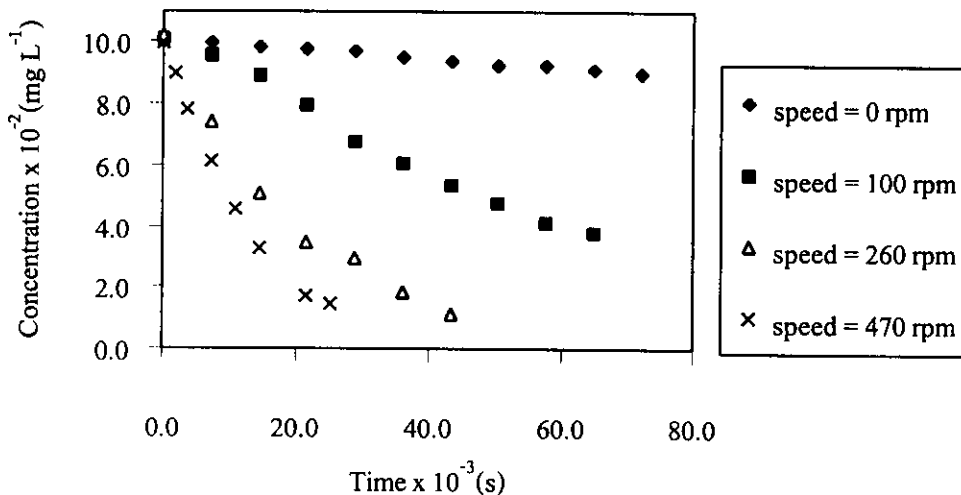
การทดลองที่	ความเร็วยกของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของอะซีโตนในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้ายของอะซีโตนในน้ำ (mg L ⁻¹)
13	0	72000	27 ± 2	1004	899
14	20	57600	27 ± 2	1117	889
15	100	64800	27 ± 2	1011	379
16	260	43200	27 ± 2	1024	108
17	470	25200	27 ± 2	994	144

2.4 ศึกษาผลของความเร็วยกต่ออัตราการระเหยของ MEK จากน้ำ

การทดลองที่	ความเร็วยกของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MEK ในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้ายของ MEK ในน้ำ (mg L ⁻¹)
18	0	64800	27 ± 2	843	705
19	20	57600	27 ± 2	885	714
20	100	50400	27 ± 2	890	241
21	260	42160	27 ± 2	880	183
22	470	10800	27 ± 2	888	287

2.5 ศึกษาผลของความเร็วยกต่ออัตราการระเหยของเบนซีนจากน้ำ

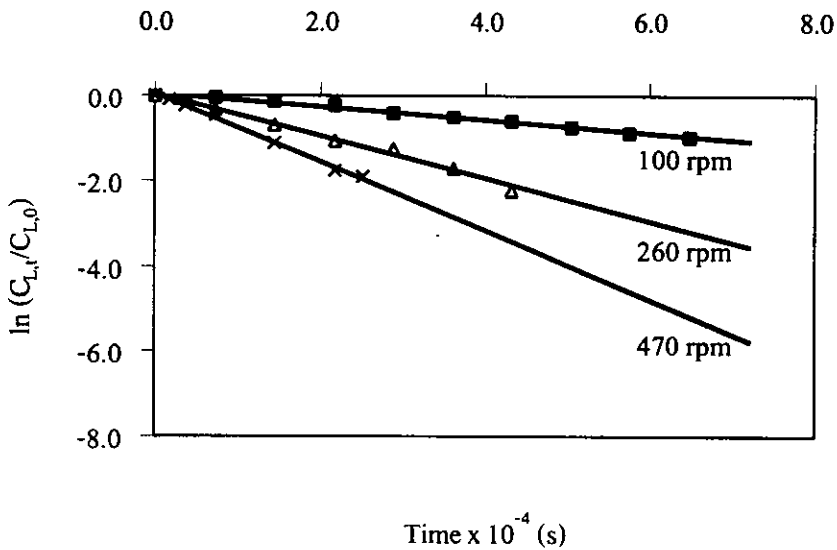
การทดลองที่	ความเร็วยกของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีนในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของเบนซีนในน้ำ (mg L^{-1})
23	0	50400	27 ± 2	296	259
24	20	21600	27 ± 2	273	85
25	100	2400	27 ± 2	289	121
26	260	840	27 ± 2	294	77
27	470	360	27 ± 2	268	46



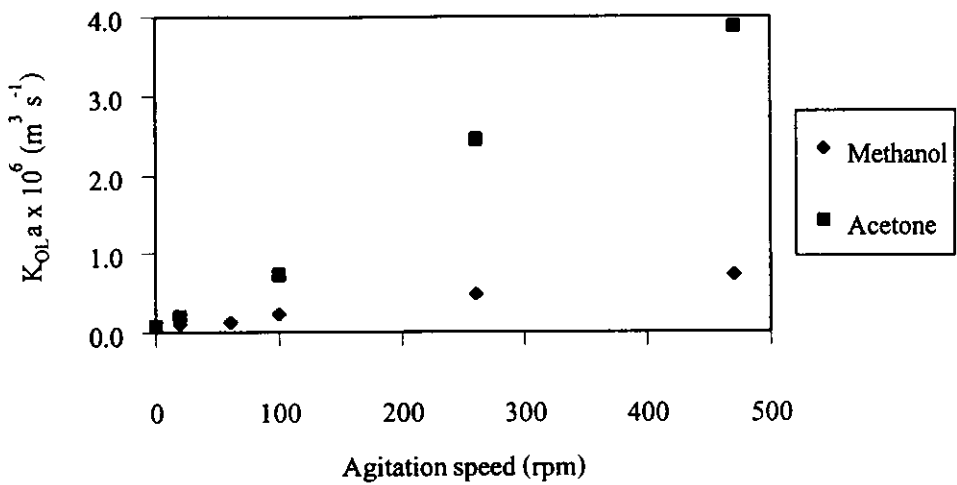
ภาพประกอบ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา สำหรับกระบวนการระเหยของอะซีโตนจากน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 27°C และความเร็วยกเท่ากับ 0, 100, 260 และ 470 rpm

1.3 ผลของความเร็วยรอบต่อ $K_{OL}a$

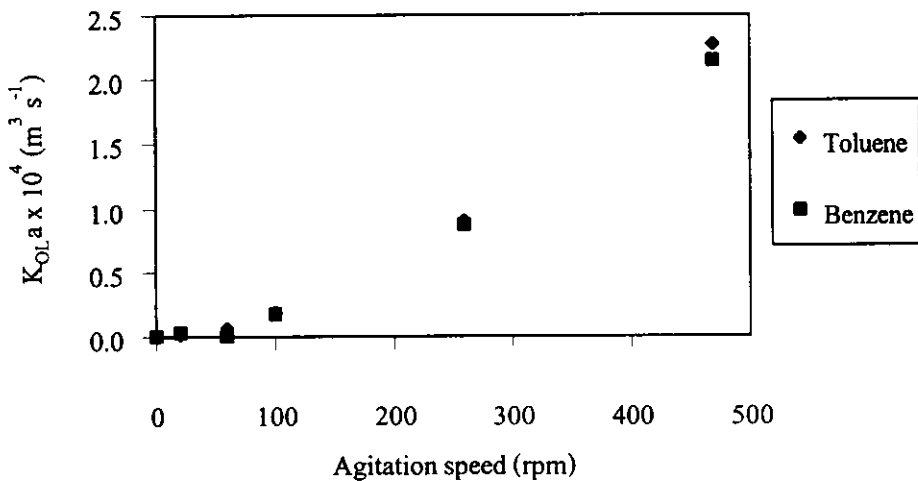
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร ($K_{OL}a$) สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs ใดๆ จากแหล่งน้ำ หาได้จากความชันของกราฟระหว่าง $\ln(C_{L,t}/C_{L,0})$ กับ t ตามสมการ (1.6) ลักษณะของกราฟดังกล่าวแสดงได้ดังภาพประกอบ 5 ซึ่งค่า $K_{OL}a$ มีค่าเท่ากับความชันของกราฟคูณด้วยปริมาตรของน้ำในถัง ตามสมการ (1.7) ข้อมูลของ $K_{OL}a$ สำหรับ VOCs ประเภทต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาในช่วงความเร็วยรอบ 0 – 470 rpm และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 27 °C แสดงไว้ในภาคผนวก ข ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยรอบกับ $K_{OL}a$ แสดงดังภาพประกอบ 6 และภาพประกอบ 7 สำหรับ VOCs ที่ค่าคงที่ของเฮนรีต่ำและสูง ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5 ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_{L,t}/C_{L,0})$ กับ t สำหรับกระบวนการระเหยของอะซีโตนจากน้ำที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C และความเร็วยรอบของการกวนในช่วง 0-470 rpm



ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับความเร็วรอบในช่วง 0-470 rpm สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับความเร็วรอบในช่วง 0-470 rpm สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูง อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C

จากภาพประกอบ 6 จะเห็นได้ว่าค่า K_{OLa} ของเมทานอลค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อความเร็วรอบมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการระเหยของเมทานอลควบคุมโดยฟิล์มในวัฏภาคแก๊ส ดังนั้นที่ความเร็วรอบต่ำๆ จะไม่มีความปั่นป่วนในวัฏภาคแก๊ส และไม่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวของการ

ระเหย ซึ่งสังเกตได้จากพื้นผิวของการระเหยค่อนข้างราบเรียบ แต่เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะทำให้เกิดความปั่นป่วนในวัฏภาคของเหลว ซึ่งนอกจากจะเพิ่มพื้นที่ผิวของการระเหยแล้ว ความปั่นป่วนในวัฏภาคของเหลวยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มแก๊สที่อยู่ติดกับชั้นฟิล์มของเหลวได้ ทำให้ $K_{OL}a$ ของเมทานอลเพิ่มขึ้น

จากภาพประกอบ 7 จะเห็นได้ว่า $K_{OL}a$ ของโทลูอินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เนื่องจากการระเหยของโทลูอินควบคุมโดยฟิล์มในชั้นของเหลว ดังนั้น อัตราการระเหยจึงขึ้นอยู่กับระดับความปั่นป่วนในวัฏภาคของของเหลวเป็นหลัก การกวนของเหลวนอกจากจะลดความหนาของฟิล์มของเหลวโดยตรงแล้วยังเพิ่มพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนมวลด้วย ส่งผลให้ $K_{OL}a$ ของโทลูอินสูงขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน

ผลการเปลี่ยนแปลงดังที่กล่าวมาสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ คือ ที่ความเร็วรอบน้อยกว่า 100 rpm ผิวหน้ามีลักษณะค่อนข้างเรียบ แต่ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 rpm หรือมากกว่านี้จะสังเกตเห็นการกระจายของน้ำเกิดขึ้นในถังกวน ดังนั้นที่ความเร็วรอบมากกว่าหรือเท่ากับ 100 rpm จึงสังเกตเห็นการเพิ่มของ $K_{OL}a$ ของทั้งเมทานอลและโทลูอินอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบน้อยกว่า 100 rpm

สำหรับ VOC ที่มีความต้านทานต่อการระเหยอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ ของ VOC กับความเร็วรอบมีลักษณะอยู่ระหว่างลักษณะของโทลูอินและลักษณะของเมทานอล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการระเหยในแต่ละวัฏภาค อย่างเช่น อะซีโตนมีเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลวน้อยกว่า 20 % มีผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ ของอะซีโตนกับความเร็วรอบมีลักษณะคล้ายกับของเมทานอล (ภาพประกอบ 6) ในขณะที่เบนซีนซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลวมากกว่า 80 % ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ ของเบนซีนกับความเร็วรอบจึงมีลักษณะคล้ายกับของโทลูอินดังแสดงในภาพประกอบ 7

1.4 ผลของความเร็วรอบต่อ k_La

k_La ได้จากกระบวนการระเหยโทลูอินจากแหล่งน้ำ ดังแสดงในสมการ (1.8) ความสัมพันธ์ระหว่าง k_La กับความเร็วรอบในเทอมของ Reynold number แสดงได้ดังภาพประกอบ 8 จากภาพประกอบดังกล่าวพบว่า k_La แปรเปลี่ยนกับ Re อย่างชัดเจน คือเมื่อ Re เพิ่มขึ้น ค่า

$k_L a$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ ของโทลูอินกับ Re ดังสมการ (3.1)

$$k_L a(\text{toluene}) = a Re^b + c \quad (3.1)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $T = 300.15 \text{ K}$

- เมื่อ $k_L a$ คือ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 a คือ ค่าคงที่, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 b คือ ค่าคงที่ (ไม่มีหน่วย)
 c คือ $k_L a$ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm จากผลการทดลองได้ $c = 1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$
 Re คือ ตัวของเรโนลด์ โดยที่

$$Re = \frac{ND_R^2}{\nu}$$

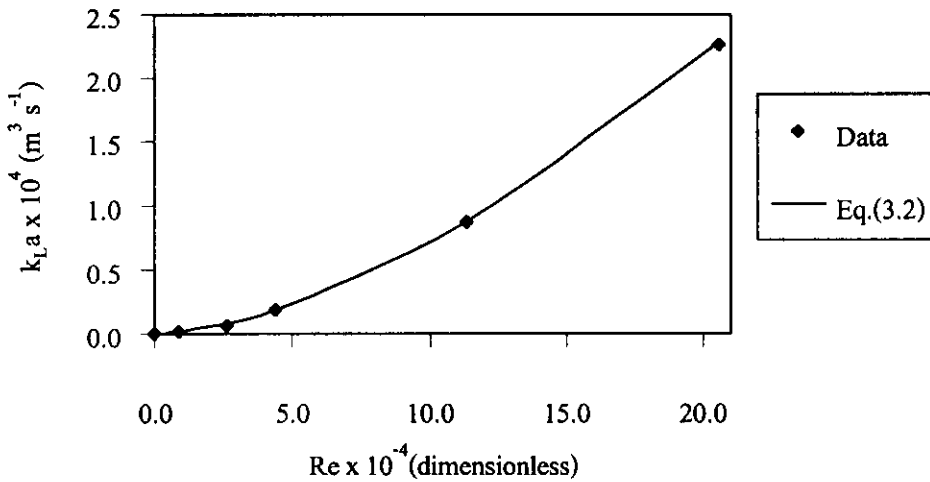
- เมื่อ D_R = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, m
 N = ความเร็วรอบของการกวน, rps
 ν = kinematic viscosity, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

จากการวิเคราะห์ข้อมูล $k_L a$ (toluene) และ Re โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $a = 5.62 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ และ $b = 1.62$ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ (toluene) กับ Re คือ

$$k_L a(\text{toluene}) = 5.62 \times 10^{-13} Re^{1.62} + 1.94 \times 10^{-7} \quad (3.2)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $T = 300.15 \text{ K}$

ค่า $k_L a$ ที่คำนวณได้โดยสมการ (3.2) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ (toluene) กับ Re ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K

1.5 ผลของความเร็วยวรอบต่อ $k_G a$

เมทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และมีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สประมาณ 90 % ดังนั้นอัตราการระเหยของเมทานอลจึงถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส และสามารถหา $k_G a$ ได้จาก $K_{OL} a$ ที่วัดได้จากการทดลองตามสมการ (1.9) ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G a$ กับความเร็วยวรอบแสดงดังภาพประกอบ 9 จะเห็นว่าค่า $k_G a$ เพิ่มขึ้นตามความเร็วยวรอบที่เพิ่มขึ้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G a$ ของเมทานอลกับความเร็วยวรอบ ดังสมการ (3.3)

$$k_G a(\text{methanol}) = a Re^b + c \quad (3.3)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $T = 300.15 \text{ K}$

เมื่อ $k_G a$ คือ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 s^{-1}$

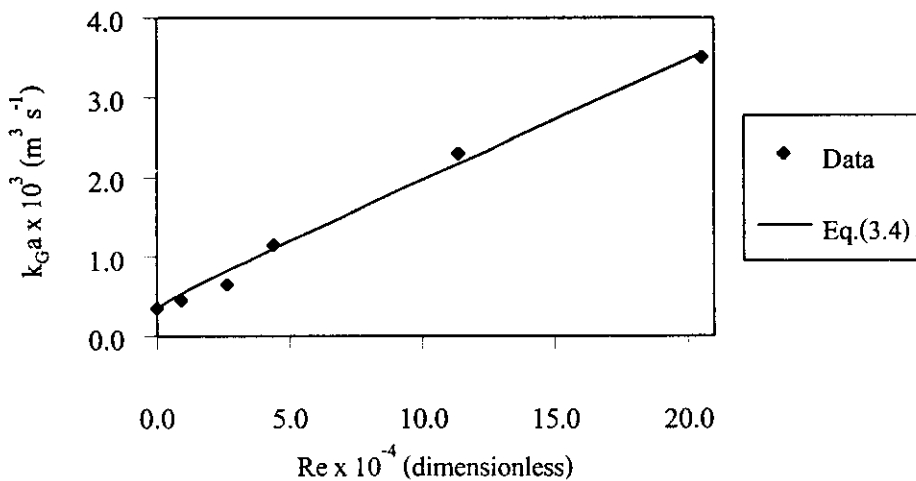
- a คือ ค่าคงที่, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 b คือ ค่าคงที่ (ไม่มีหน่วย)
 c คือ k_{Ga} ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm จากผลการทดลองได้ $c = 3.55 \times 10^{-4} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$

จากการวิเคราะห์ข้อมูล k_{Ga} (methanol) และ Re โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $a = 3.24 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ และ $b = 0.94$ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} (methanol) กับ Re คือ

$$k_{Ga}(\text{methanol}) = 3.24 \times 10^{-8} \text{Re}^{0.94} + 3.55 \times 10^{-4} \quad (3.4)$$

สำหรับ $0 \leq \text{Re} \leq 2.05 \times 10^5$ และ $T = 300.15 \text{K}$

ค่า k_{Ga} ของเมทานอลที่คำนวณจากสมการ (3.4) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ดังแสดงด้วยเส้นทึบในภาพประกอบ 9

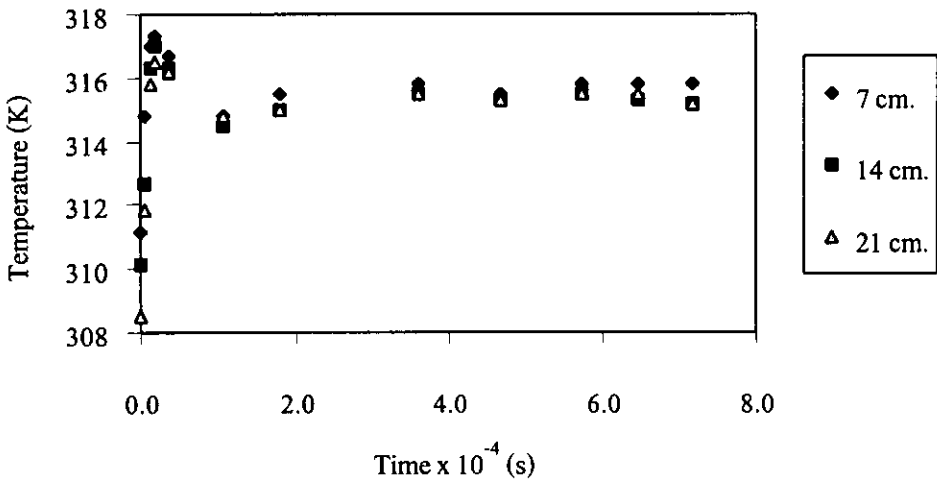


ภาพประกอบ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} (methanol) กับ Re ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K

2. ผลของอุณหภูมิของแหล่งน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

2.1 ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในถัง และการหาอุณหภูมิเฉลี่ย

อุณหภูมิของน้ำภายในถังกวนถูกทำให้ร้อนโดยขดลวดความร้อนที่ติดตั้งอยู่บริเวณก้นของถังดังแสดงในภาพประกอบ 1 และควบคุมโดยสวิตช์เปิดปิดการทำงานของขดลวดความร้อน ลักษณะของอุณหภูมิภายในถังที่เวลาต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีกรกวนน้ำ พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงกว่าอุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกของน้ำในช่วงประมาณ 6 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงสม่ำเสมอตลอดทั้งถัง ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความลึก ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 315.15 K แสดงดังภาพประกอบ 10 ส่วนข้อมูลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ง



ภาพประกอบ 10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความลึก ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 315.15 K

อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาของการทดลองคำนวณได้จากสมการ (3.5)

$$T_{\text{avg}} = \frac{1}{t} \int_0^t T(t) dt \quad (3.5)$$

โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใช้ในการศึกษานี้ มีค่าเป็น 300.15, 315.15, 321.15, 327.15 และ 331.15 K สภาวะการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 สภาวะการทดลอง : ผลของอุณหภูมิจากแหล่งน้ำ

3.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของเมทานอลจากน้ำ

การทดลองที่	อุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำ (K)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทานอลในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของเมทานอลในน้ำ (mg L^{-1})
28	300.15	72000	1261	1137
29	315.15	72000	1296	1001
30	321.15	64800	1290	891
31	327.15	72000	1215	573
32	331.15	64800	1243	507

3.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของโทลูอินจากน้ำ

การทดลองที่	อุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำ (K)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโทลูอินในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของโทลูอินในน้ำ (mg L^{-1})
33	300.15	68400	273	193
34	315.15	36000	149	110
35	321.15	37800	160	96
36	327.15	37800	124	62
37	331.15	37800	158	79

3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของอะซีโตนจากน้ำ

การทดลองที่	อุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำ (K)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของอะซีโตนในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของอะซีโตนในน้ำ (mg L^{-1})
38	300.15	72000	1004	899
39	315.15	64800	707	420
40	327.15	64800	1019	358

3.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของ MEK จากน้ำ

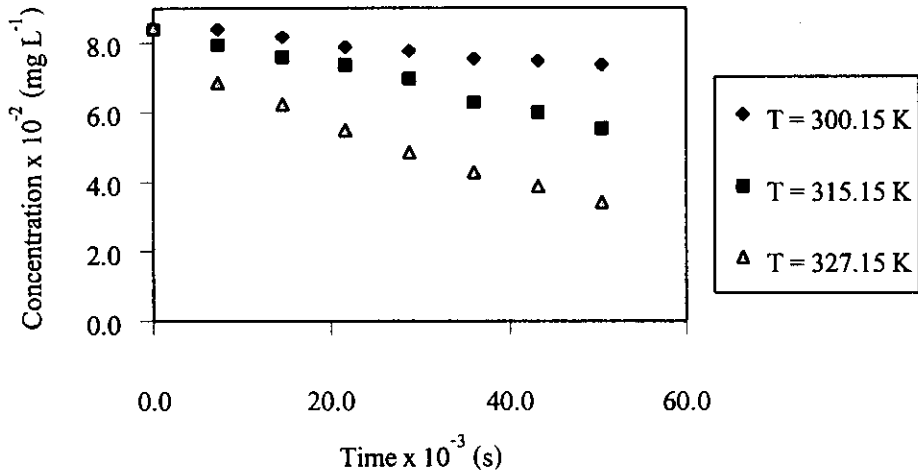
การทดลองที่	อุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำ (K)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MEK ในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของ MEK ในน้ำ (mg L^{-1})
41	300.15	68400	843	705
42	304.15	57600	1188	826
43	315.15	57600	920	554
44	321.15	50400	923	439
45	327.15	57600	845	318

3.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของเบนซีนจากน้ำ

การทดลอง ที่	อุณหภูมิเฉลี่ย ของแหล่งน้ำ (K)	ระยะเวลา การทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของเบนซีนในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้าย ของเบนซีนในน้ำ (mg L ⁻¹)
46	300.15	50400	296	259
47	315.15	36000	244	175
48	327.15	36000	281	195

2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา

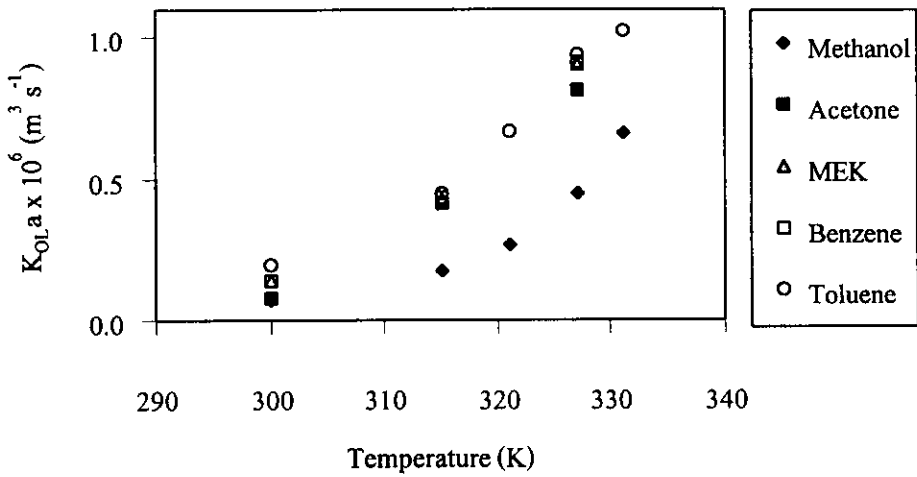
อุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำ ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MEK กับเวลา ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 11 จะเห็นว่าความเข้มข้นของ MEK จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของสารเกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและเกิดการชนกันมากขึ้น เป็นผลให้โมเลกุลมีพลังงานสูงพอที่จะเอาชนะแรงต้านที่ผิวสัมผัสได้ โมเลกุลของสารจึงหลุดออกจากวัฏภาคของของเหลว ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆของ VOCs อื่นที่ศึกษาก็จะมีลักษณะในทำนองเดียวกันดังรายงานไว้ในภาคผนวก ค



ภาพประกอบ 11 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา สำหรับกระบวนการระเหยของ MEK ที่ความเร็วรอบ 0 rpm และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15, 315.15 และ 327.15 K

2.3 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ $K_{OL}a$

$K_{OL}a$ ของ VOC ใดๆคำนวณตามสมการ (1.6) ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับ อุณหภูมิเฉลี่ยของ VOCs ทั้ง 5 ชนิดแสดงดังภาพประกอบ 12 จะเห็นว่าค่า $K_{OL}a$ ของ VOC เหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่สูงขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า $K_{OL}a$ (Toluene) > $K_{OL}a$ (Benzene) > $K_{OL}a$ (MEK) > $K_{OL}a$ (Acetone) > $K_{OL}a$ (Methanol)



ภาพประกอบ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL,a}$ ของ VOCs กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง 300.15 K – 331.15 K ที่ความเร็วรอบ 0 rpm

2.4 ผลของอุณหภูมิต่อ $k_{L,a}$

$k_{L,a}$ ได้จากกระบวนการระเหยโทลูอินจากแหล่งน้ำ ดังแสดงในสมการ (1.8) ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a}$ ของโทลูอินกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง 300.15 – 331.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm แสดงดังภาพประกอบ 13 จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นว่า $k_{L,a}$ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a}$ กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำได้ดังสมการ

$$k_{L,a}(\text{toluene}) = k_{L,a}(\text{at } 300.15 \text{ K}) \exp(a(T-300.15))$$

เนื่องจาก $k_{L,a}$ ที่ 300.15 K เท่ากับ $1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ดังนั้น จะได้

$$k_{L,a}(\text{toluene}) = 1.94 \times 10^{-7} \exp(a(T-300.15)) \quad (3.6)$$

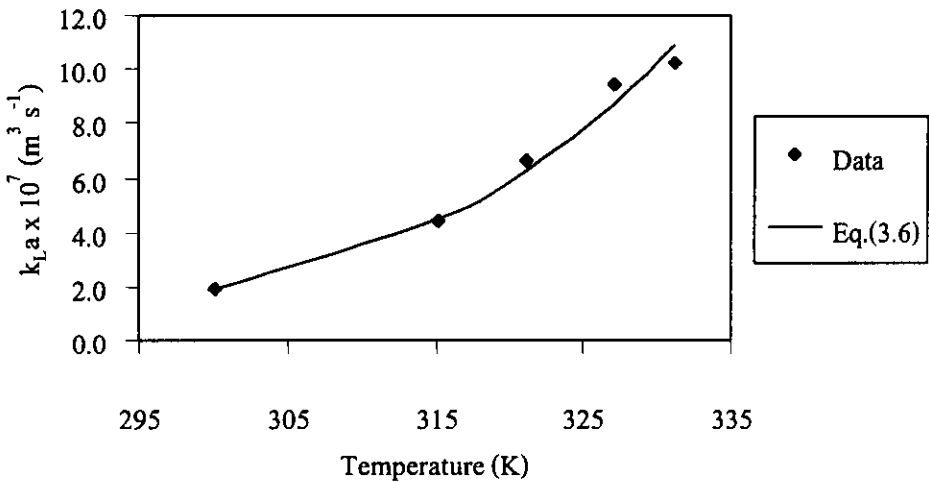
สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

เมื่อ a คือ ค่าคงที่ (ไม่มีหน่วย) จากการวิเคราะห์ข้อมูล k_{La} (toluene) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $a = 0.0556$ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} (toluene) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำคือ

$$k_{La}(\text{toluene}) = 1.94 \times 10^{-7} \exp(0.0556(T - 300.15)) \quad (3.7)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

k_{La} ของโทลูอินที่คำนวณจากสมการ (3.7) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} (toluene) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง $300.15 \text{ K} - 331.15 \text{ K}$ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

2.5 ผลของอุณหภูมิต่อ k_{Ga}

k_{Ga} ของเมทานอลสำหรับกระบวนการระเหยของเมทานอลจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $300.15 \text{ K} - 331.15 \text{ K}$ และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm สามารถคำนวณได้ตามสมการ (1.9) ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} ของเมทานอลกับอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวแสดงดังภาพประกอบ 14 จะเห็นว่า k_{Ga} ของเมทานอลเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ นั่นคือ

เมื่ออุณหภูมิของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่า $k_G a$ เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G a$ ของเมทานอลกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำได้ดังสมการ

$$k_G a (\text{methanol}) = k_G a (\text{at } 300.15 \text{ K}) \exp(a(T-300.15))$$

เนื่องจาก $k_G a$ ที่ 300.15 K เท่ากับ $3.55 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ดังนั้น จะได้

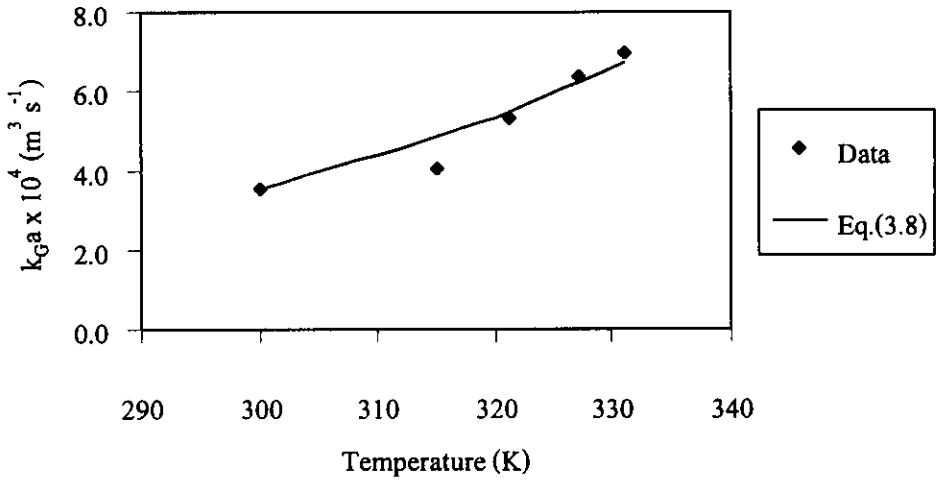
$$k_G a (\text{methanol}) = 3.55 \times 10^{-4} \exp(a(T-300.15)) \quad (3.8)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

เมื่อ a คือค่าคงที่ (ไม่มีหน่วย) จากการวิเคราะห์ข้อมูล $k_G a$ (methanol) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $a = 0.0206$ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G a$ (methanol) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำคือ

$$k_G a (\text{methanol}) = 3.55 \times 10^{-4} \exp(0.0206(T-300.15)) \quad (3.9)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm



ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{g,a}$ (methanol) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง 300.15 K – 331.15 K ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

3. สมการเอมพิริคัลของ $k_{l,a}$ และ $k_{g,a}$

จากสมการเอมพิริคัลของ $k_{l,a}$ และ $k_{g,a}$ กับอุณหภูมิที่ได้จากการระเหยของโทลูอีน และเมทานอล ข้างต้น สามารถปรับเป็นสมการต่างๆไป เพื่อให้ใช้กับ VOCs อื่นๆได้ โดยใช้ อัตราส่วนของน้ำหนักของโมเลกุลของ VOCs ที่สนใจต่อน้ำหนักของโมเลกุลของสารอ้างอิง เป็นตัวปรับแก้สมการ (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ

$$k_{l,a} (VOC) = (1.94 \times 10^{-7}) \left(\exp(0.0556(T - 300.15)) \right) \left(\frac{M_{Toluene}}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (3.10)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$

$$k_{g,a} (VOC) = (3.55 \times 10^{-4}) \left(\exp(0.0206(T - 300.15)) \right) \left(\frac{M_{Methanol}}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (3.11)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$

สมการ (3.10) และสมการ (3.11) พัฒนาจากข้อมูลการระเหยขณะที่ไม่มีการกวน ซึ่งพบว่ามีการเคลื่อนที่ของอณูโมเลกุลจึงเหมาะสมสำหรับการทำนาย $K_{OL}a$ ในกรณีที่ไม่มีการกวนและมีการเคลื่อนที่ของอณูโมเลกุลเท่านั้น สำหรับกรณีที่มีการกวน ที่อณูโมเลกุลต่างๆ พบว่าอณูโมเลกุลของน้ำส้มำเสมอทั่วทั้งถัง จากสมการ k_La และ k_Ga ที่แสดงด้วยสมการ (3.2) และ (3.4) สามารถปรับแก้เป็นสมการทั่วไปเพื่อให้ใช้ได้กับ VOCs อื่นๆที่อณูโมเลกุลใดๆได้โดยใช้ อัตราการแพร่เป็นตัวปรับแก้ได้ดังสมการ (3.12) และ (3.13)

$$k_La(VOC) = \left(1.94 \times 10^{-7} + 5.62 \times 10^{-13} Re^{1.62} \right) \left(\frac{D_{VOC-liq}}{D_{ref-liq}} \right) \quad (3.12)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 327.15 \text{ K}$

$$k_Ga(VOC) = \left(3.55 \times 10^{-4} + 3.24 \times 10^{-8} Re^{0.94} \right) \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{ref-air}} \right) \quad (3.13)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 327.15 \text{ K}$

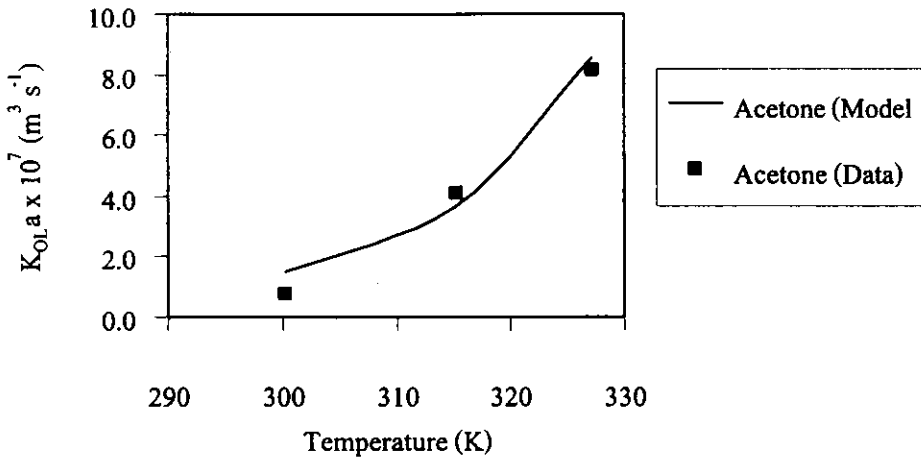
4. การเปรียบเทียบ $K_{OL}a$ ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลกับผลการทดลอง

4.1 กรณีที่มีการแปรเปลี่ยนของอณูโมเลกุลที่ความเร็วรอบเป็นศูนย์

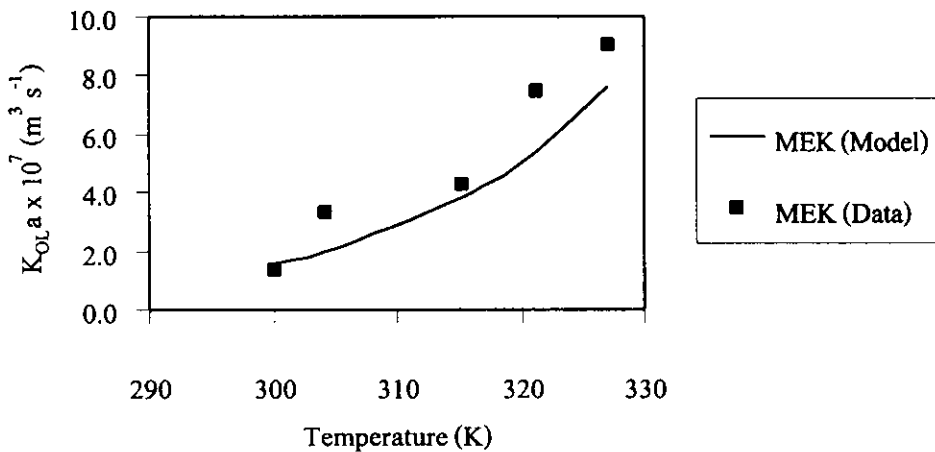
การตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพิริคัล (สมการ (3.10) และ (3.11)) ของ k_La และ k_Ga ในกรณีที่อณูโมเลกุลแปรเปลี่ยนโดยไม่มีการกวน ได้ผลการคำนวณค่า k_La และ k_Ga ของอะซีโตน, MEK และเบนซีน ดังตาราง 4 ส่วนค่า $K_{OL}a$ ที่คำนวณจากค่า k_La , k_Ga เหล่านี้ และค่าของ T และ H ตามสมการ (สมการ (3.10) และ (3.11)) แสดงเปรียบเทียบกับค่า $K_{OL}a$ ที่ได้จากการทดลอง ในภาพประกอบ 15 ถึง 17

ตาราง 4 แสดงค่าการคำนวณ $k_G a$ และ $k_L a$ ของ VOCs

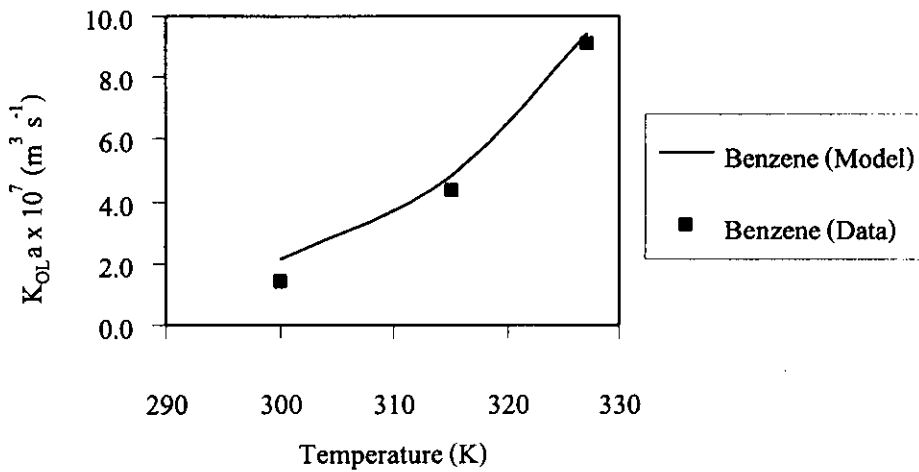
Compound	T (K)	H (atm m ³ mol ⁻¹)	$k_G a$ (m ³ s ⁻¹) × 10 ⁴	$k_L a$ (m ³ s ⁻¹) × 10 ⁷
Acetone	300.15	3.694×10^{-5}	2.640	2.443
	315.15	7.660×10^{-5}	3.590	5.626
	327.15	1.308×10^{-4}	4.600	13.809
MEK	300.15	5.591×10^{-5}	2.370	2.193
	304.15	6.960×10^{-5}	2.570	2.739
	315.15	1.235×10^{-4}	3.220	5.049
	321.15	1.662×10^{-4}	3.650	7.048
	327.15	2.211×10^{-4}	4.130	9.840
Benzene	300.15	6.850×10^{-3}	2.270	2.107
	315.15	1.310×10^{-2}	3.100	4.851
	327.15	2.114×10^{-2}	3.970	9.454



ภาพประกอบ 15 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัลสำหรับการระเหยของอะซิโตนจากแหล่ง น้ำที่สภาวะอุณหภูมิแปรเปลี่ยนในช่วง 300.15 K - 327.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm



ภาพประกอบ 16 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของ MEK จากแหล่ง น้ำที่สภาวะอุณหภูมิแปรเปลี่ยนในช่วง 300.15 K - 327.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm



ภาพประกอบ 17 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพริคัล สำหรับการระเหยของเบนซีนจากแหล่ง น้ำที่สภาวะอุณหภูมิแปรเปลี่ยนในช่วง 300.15 K - 327.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

จากภาพประกอบ 15 -17 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอ็มพริคัลที่พัฒนาขึ้น (สมการ (3.10) และสมการ (3.11)) กับผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการการระเหยของอะซีโตน MEK และเบนซีนจากแหล่งน้ำที่สภาวะอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่แปรเปลี่ยนในช่วง 300.15 K และ 327.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm พบว่า K_{OLa} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอ็มพริคัลมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นสมการเอ็มพริคัลที่พัฒนาที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้สภาวะดังกล่าวได้

4.2 กรณีที่มีการแปรเปลี่ยนของความเร็วรอบที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพริคัลของ $k_G a$ และ $k_L a$ (สมการ (3.12) และสมการ (3.13)) เมื่อประยุกต์ใช้กับสภาวะที่ความเร็วรอบแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ ทำได้โดยการเปรียบเทียบระหว่าง K_{OLa} ที่วัดโดยตรงจากกระบวนการระเหยของอะซีโตน MEK และเบนซีนจากแหล่งน้ำกับ K_{OLa} ที่คำนวณโดยใช้สมการ (3.12) ถึงสมการ (3.13) ร่วมกับสมการ (1.2) ซึ่งสภาวะการทดลองที่ความเร็วรอบแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิเท่ากับ 27 °C และ 40 °C ดังตาราง 5 และค่า $k_G a$ และ $k_L a$ ของอะซีโตน MEK และเบนซีนที่

คำนวณจากสมการ (3.12) และ (3.13) แสดงดังตาราง 6 ส่วนค่า K_{OLa} ที่คำนวณได้แสดงเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภาพประกอบ 18 - 22

ตาราง 5 ข้อมูลการทดลอง

5.1 ผลของความเร็วยรอบและอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของอะซีโตนจากน้ำ

การทดลองที่	ความเร็วยรอบ ของการกวน (rpm)	ระยะเวลา การทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของอะซีโตน ในแหล่งน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้าย ของอะซีโตนใน แหล่งน้ำ (mg L ⁻¹)
49	0	64800	707	420
50	100	39600	1239	292
51	260	18000	1231	236

5.2 ผลของความเร็วยรอบและอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยของเบนซีนจากน้ำ

การทดลองที่	ความเร็วยรอบ ของการกวน (rpm)	ระยะเวลา การทดลอง (s)	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของเบนซีนใน แหล่งน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้าย ของเบนซีนใน แหล่งน้ำ (mg L ⁻¹)
52	0	36000	244	175
53	100	2820	288	96
54	260	780	288	64

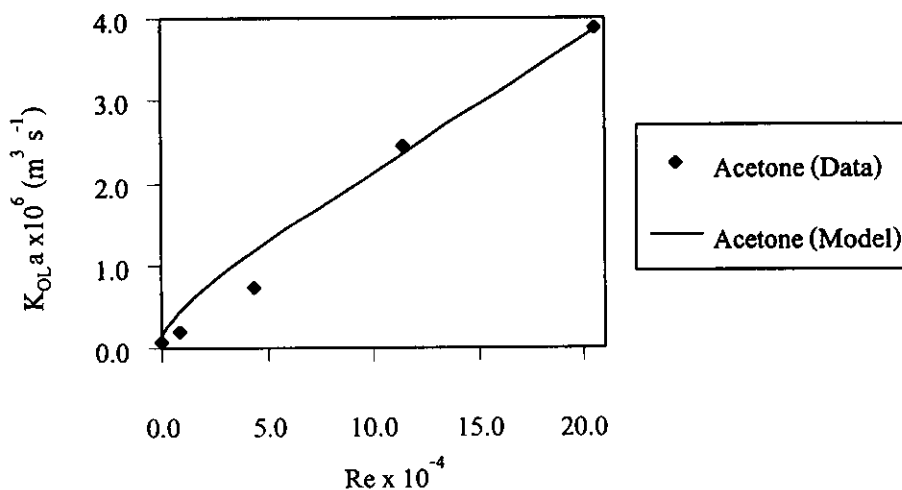
ตาราง 6 แสดงค่าการคำนวณ $k_G a$ และ $k_L a$ ของ VOCs

6.1 กรณีอุณหภูมิจากแหล่งน้ำเท่ากับ 27 °C

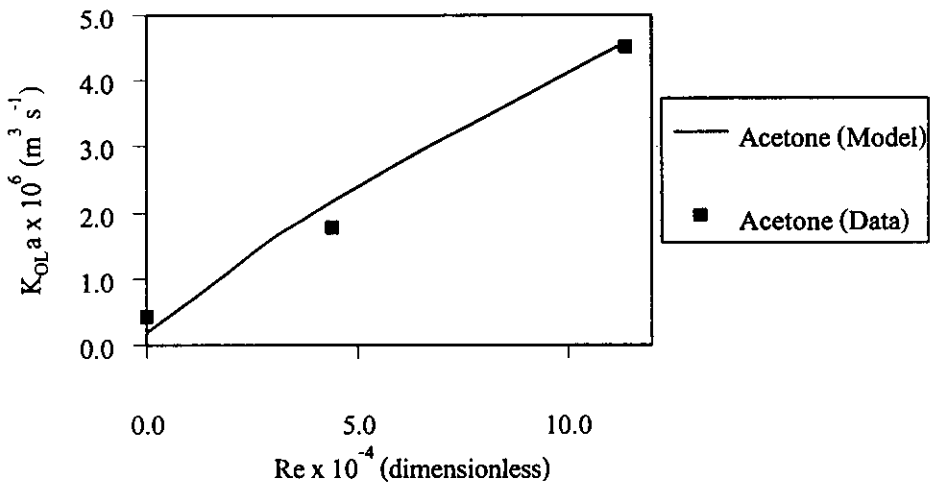
Compound	$Re \times 10^{-5}$	$k_G a \times 10^3$ ($m^3 s^{-1}$)	$k_L a \times 10^5$ ($m^3 s^{-1}$)	$H \times 10^3$ ($atm m^3 mol^{-1}$)	$D_{VOC-air} \times 10^5$ ($m^2 s^{-1}$)	$D_{VOC-liquid} \times 10^5$ ($cm^2 s^{-1}$)
Acetone	0.000	0.261	0.002	0.037	1.107	1.213
	0.087	0.382	0.020	0.037	1.107	1.213
	0.437	0.810	2.427	0.037	1.107	1.213
	1.137	1.608	11.321	0.037	1.107	1.213
	2.055	2.612	29.500	0.037	1.107	1.213
MEK	0.000	0.229	0.002	0.056	9.708	1.039
	0.087	0.335	0.017	0.056	9.708	1.039
	0.437	0.710	2.081	0.056	9.708	1.039
	1.137	1.411	9.705	0.056	9.708	1.039
	2.055	2.290	25.290	0.056	9.708	1.039
Benzene	0.000	0.229	0.003	6.850	9.705	1.351
	0.087	0.335	0.023	6.850	9.705	1.351
	0.437	0.710	2.706	6.850	9.705	1.351
	1.137	1.410	12.621	6.850	9.705	1.351
	2.055	2.290	32.889	6.850	9.705	1.351

6.2 กรณีอุณหภูมิจากแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

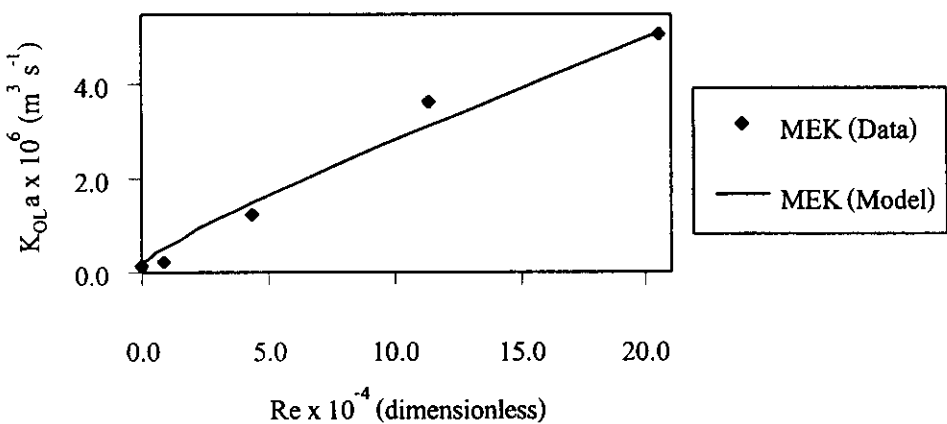
Compound	$Re \times 10^{-5}$	$k_{Ga} \times 10^2$ ($m^3 s^{-1}$)	$k_{La} \times 10^5$ ($m^3 s^{-1}$)	$H \times 10^3$ ($atm m^3 mol^{-1}$)	$D_{VOC-air} \times 10^5$ ($m^2 s^{-1}$)	$D_{VOC-liquid} \times 10^5$ ($cm^2 s^{-1}$)
Acetone	0.000	0.026	0.025	0.076	1.214	1.273
	0.437	0.081	2.427	0.076	1.214	1.273
	1.137	0.161	11.318	0.076	1.214	1.273
Benzene	0.000	0.039	0.028	13.120	1.065	1.419
	0.437	0.122	2.705	13.120	1.065	1.419
	1.137	0.243	12.617	13.120	1.065	1.419



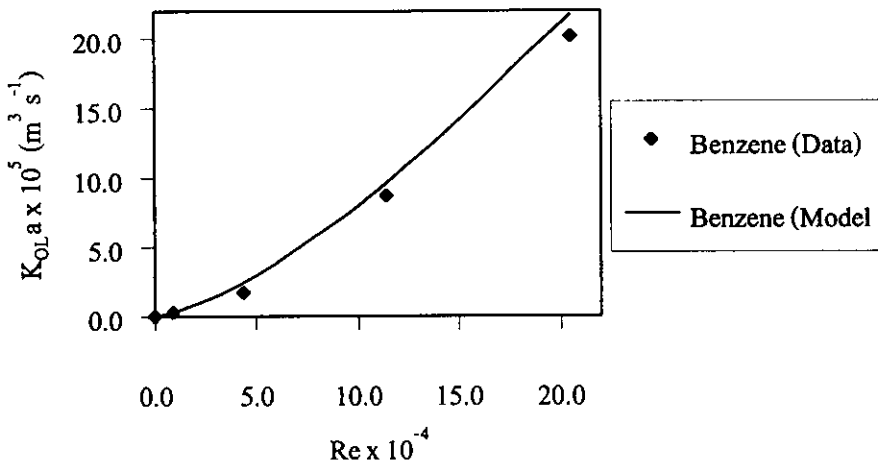
ภาพประกอบ 18 การเปรียบเทียบค่า $K_{OL} a$ จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ
 เอ็มพิริคัล (สมการ (3.12) ถึงสมการ (3.13)) สำหรับการระเหยของอะซีโตน
 จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิ
 ของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K



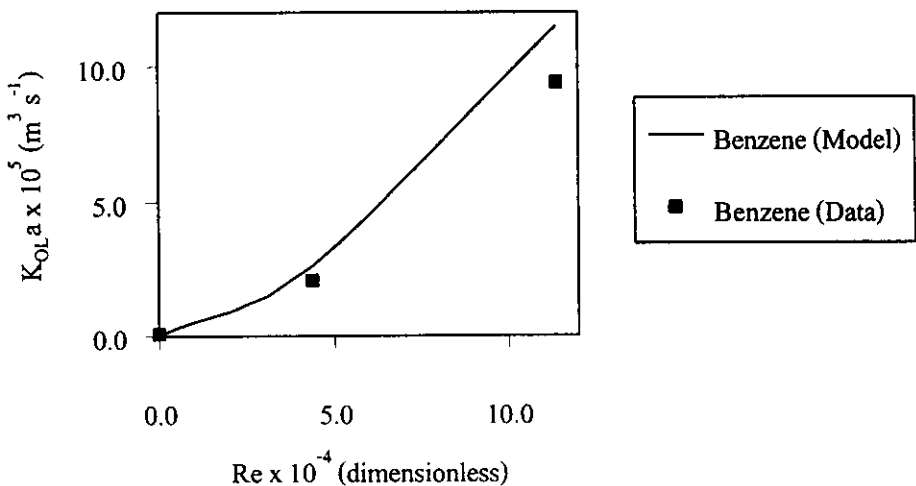
ภาพประกอบ 19 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพริคัล (สมการ (3.12) ถึงสมการ (3.13)) สำหรับการระเหยของอะซีโตน จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-260 rpm และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 315.15 K



ภาพประกอบ 20 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพริคัล (สมการ (3.12) ถึงสมการ (3.13)) สำหรับการระเหยของ MEK จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วรอบ เปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K



ภาพประกอบ 21 การเปรียบเทียบค่า $K_{OL} a$ จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพริคัล(สมการ (3.12) ถึงสมการ (3.13)) สำหรับการระเหยของเบนซีน จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K



ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบค่า $K_{OL} a$ จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพริคัล(สมการ (3.12) ถึงสมการ (3.13)) สำหรับการระเหยของเบนซีน จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-260 rpm และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 315.15 K

จากภาพประกอบดังกล่าวพบว่า K_{OLa} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการมีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดได้โดยตรงจากการทดลอง แสดงว่าสมการเอ็มพิริคัลที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสภาวะดังกล่าวได้

5. ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

จะเห็นได้ว่าผลของการกวนและผลของอุณหภูมิ ทำให้ VOC ระเหยจากบ่อกวนได้มาก แนวทางในการลดคือ ใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่ตามธรรมชาติ หรือเติมลงไปเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการระเหย จึงนำไปสู่การศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ k_{La} , k_{Ga} ที่สภาวะต่างๆ

5.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในสภาวะที่ความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 100 rpm และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเปลี่ยน

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษาคือ sodium dodecyl sulphate (SDS) การทดลองเริ่มต้นโดยการเตรียมสารละลาย VOCs ที่ผสม SDS ความเข้มข้น 100-400 mg/L ในน้ำปริมาตร 50 ลิตร จากนั้นใส่สารละลายดังกล่าวลงในถังกวนเดิมอากาศ แล้วปรับความเร็วรอบให้ได้ 100 rpm ซึ่งแสดงสภาวะการทดลองดังตาราง 7

ตาราง 7 สภาวะการทดลอง : ผลของสารลดแรงตึงผิว

7.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่ออัตราการระเหยของ โทลูอินจากน้ำ

การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mg/L)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโทลูอินในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้ายของโทลูอินในน้ำ (mg L ⁻¹)
55	100	10800	27±2	159	34
56	200	10800	27±2	149	39
57	300	10800	27±2	133	41
58	400	10800	27±2	161	47

7.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่ออัตราการระเหยของเมทานอลจากน้ำ

การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mg/L)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทานอลในน้ำ (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นสุดท้ายของเมทานอลในน้ำ (mg L ⁻¹)
59	100	50400	27±2	805	717
60	200	50400	27±2	811	739
61	300	50400	27±2	808	765
62	400	50400	27±2	765	707

5.1.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$

$k_L a$ ได้จากกระบวนการระเหยของทูลออื่นจากแหล่งน้ำคังแสดงในสมการ (1.8) ซึ่งค่า $k_L a$ ของทูลออื่นที่ได้ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆสามารถแสดงในเทอมของตัวแปรไร้หน่วย ในรูปของอัตราส่วนของ $k_L a$ ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$ ที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวดังสมการ (3.14) คือ

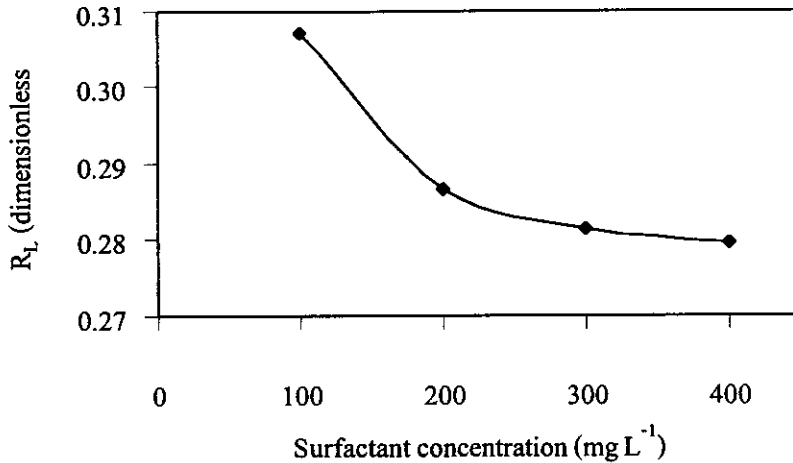
$$R_L = \frac{(k_L a)_s}{(k_L a)_0} \quad (3.14)$$

เมื่อ R_L = อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลว, ไม่มีหน่วย

$(k_L a)_s$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลวเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว, $m^3 s^{-1}$

$(k_L a)_0$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลวเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว, $m^3 s^{-1}$

ความสัมพันธ์ระหว่าง R_L กับ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆแสดงได้ดัง



ภาพประกอบ 23 แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

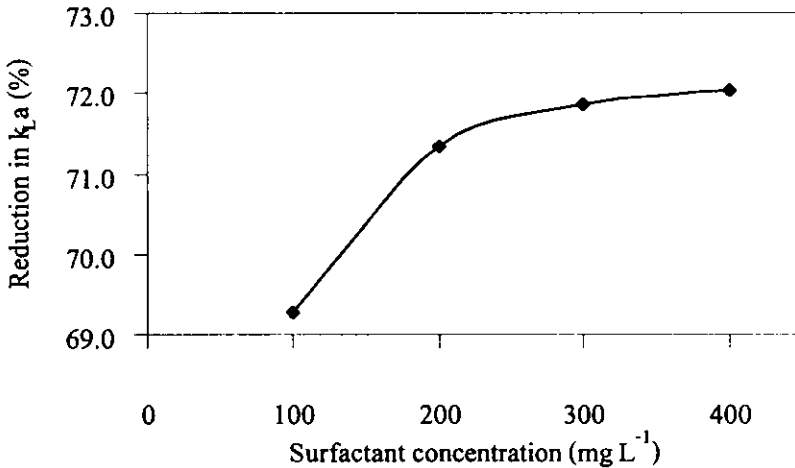
จากภาพประกอบ 23 จะเห็นได้ว่า R_L จะลดลงตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นในช่วงตั้งแต่ 100-200 mg/L จากนั้นจะเริ่มคงตัวในช่วงความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 200-400 mg/L ซึ่งในการวัดความสามารถของสารลดแรงตึงผิวอาจแสดงในรูปแบบของร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลว (Reduction in $k_{L,a}$) เทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวดังสมการ (3.15) คือ

$$\text{Reduction in } k_{L,a} (\%) = (1 - R_L) \times 100 \quad (3.15)$$

ค่าร้อยละการลดลงของ $k_{L,a}$ ที่คำนวณได้ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ แสดงดังตาราง 8 และภาพประกอบ 24

ตาราง 8 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลว ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mg L^{-1})	100	200	300	400
Reduction in $k_{\text{L}a}$, (%)	69	71	72	72



ภาพประกอบ 24 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

จากภาพประกอบ 24 พบว่า ร้อยละการลดลงของ $k_{\text{L}a}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 200 mg/L พบว่า ร้อยละการลดลงของ $k_{\text{L}a}$ จะเริ่มคงตัว แสดงว่าความเข้มข้น SDS ที่เหมาะสมในการลดค่า $k_{\text{L}a}$ คือประมาณ 300 mg/L โดยมีร้อยละการลดลงของ $k_{\text{L}a}$ เท่ากับ 72 % การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การมีสารลดแรงตึงผิวในน้ำจะทำให้การระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_G a$

$k_G a$ สามารถวัดได้จากกระบวนการการระเหยของเมทานอลจากน้ำค้างที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว ค่า $k_G a$ ของเมทานอลที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ สามารถแสดงในเทอมของตัวแปรไร้หน่วยได้ในทำนองเดียวกับ $k_L a$ คือ

$$R_G = \frac{(k_G a)_s}{(k_G a)_0} \quad (3.16)$$

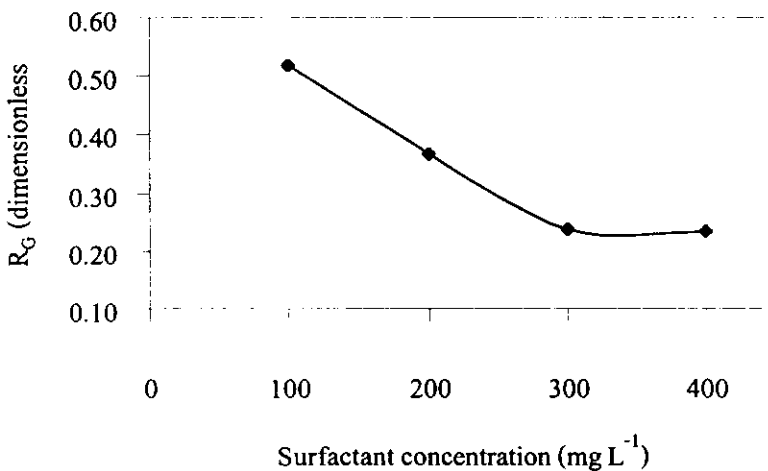
เมื่อ R_G = อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊ส, ไม่มีหน่วย

$(k_G a)_s$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊สเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว, $m^3 s^{-1}$

$(k_G a)_0$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊สเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว, $m^3 s^{-1}$

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R_G กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

แสดงดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊สที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

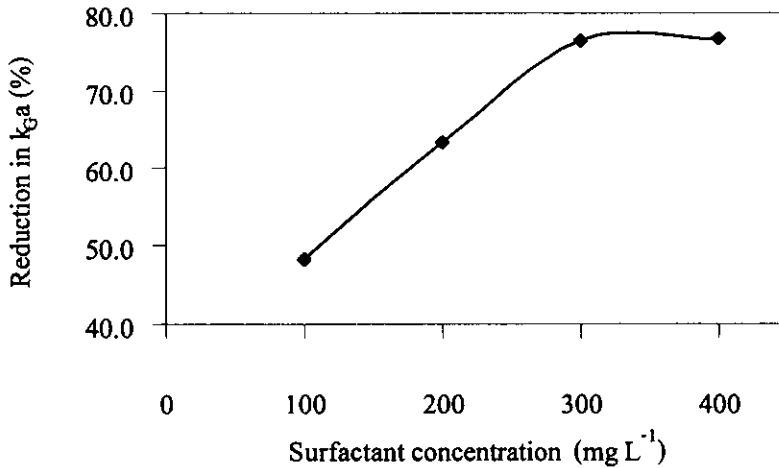
จากภาพประกอบ 25 จะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันกับกรณีของ k_{La} นั่นคือ R_G จะลดลงตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น จากนั้นจะเริ่มคงตัวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวตั้งแต่ 300-400 mg/L สำหรับการคำนวณร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊สเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวแสดงได้ดังสมการ (3.17)

$$\text{Reduction in } k_{Ga} (\%) = (1 - R_G) \times 100 \quad (3.17)$$

ค่าร้อยละการลดลงของ k_{Ga} ที่คำนวณได้จากสมการ (3.17) แสดงดังตาราง 9 และภาพประกอบ 26

ตาราง 9 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊สที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mg L ⁻¹)	100	200	300	400
Reduction in k_{Ga} (%)	48	63	76	77



ภาพประกอบ 26 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊ส ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

จากภาพประกอบ 26 จะเห็นว่าร้อยละการลดลงของ k_{Ga} เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นและเริ่มคงตัวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 300 mg/L และการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่า 300 mg/L ก็จะไม่เพิ่มร้อยละการลดลงของ k_{Ga} ไม่เกิน 1 % เมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 300 mg/L ดังนั้นความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมในการลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊สคือ 300 mg/L ซึ่งให้ค่าร้อยละการลดลงของ k_{Ga} ประมาณ 76 %

5.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 300 mg/L และความเร็วยวรอบเปลี่ยน

เตรียมสารละลาย VOCs ที่สนใจให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการปริมาตร 50 ลิตร และผสมสารลดแรงตึงผิว sodium dodecyl sulphate ลงไปให้มีความเข้มข้น 300 mg/L จากนั้นจึงใส่สารละลายผสมดังกล่าวในถังกวนเติมอากาศและปรับความเร็วยวรอบให้ได้ตามต้องการ ดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 สภาวะการทดลอง : ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ k_{La} และ k_{Ga} ที่ความเร็วรอบต่างๆ

10.1 ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่ออัตราการระเหยของโทลูอินจากน้ำ

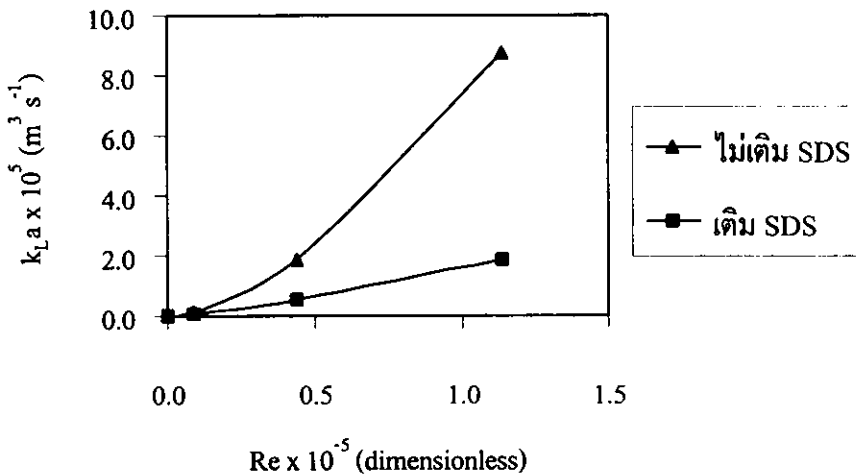
การทดลองที่	ความเร็วรอบของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโทลูอินในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของโทลูอินในน้ำ (mg L^{-1})
63	0	50400	27 ± 2	119	107
64	20	50400	27 ± 2	156	57
65	100	10800	27 ± 2	133	41
66	260	4800	27 ± 2	161	25

10.2 ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่ออัตราการระเหยของเมทานอลจากน้ำ

การทดลองที่	ความเร็วรอบของการกวน (rpm)	ระยะเวลาการทดลอง (s)	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทานอลในน้ำ (mg L^{-1})	ความเข้มข้นสุดท้ายของเมทานอลในน้ำ (mg L^{-1})
67	0	57600	27 ± 2	704	681
68	20	57600	27 ± 2	761	723
69	100	50400	27 ± 2	808	765
70	260	57600	27 ± 2	732	523

5.2.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ k_{La} ที่ความเร็วรอบต่างๆ

k_{La} สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของทูลอีนจากน้ำตามสมการ (1.8) k_{La} ในกรณีที่มีการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg L^{-1} แสดงเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม SDS ดังภาพประกอบ 27

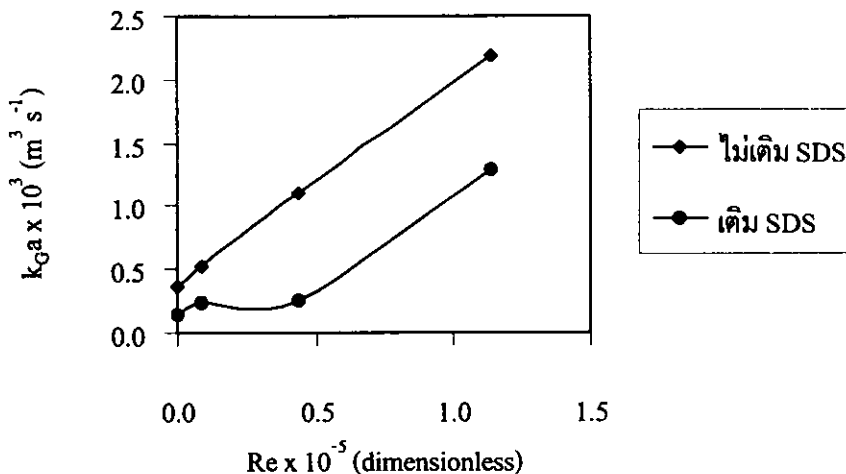


ภาพประกอบ 27 เปรียบเทียบ k_{La} ของทูลอีนที่มีความเร็วรอบของการกวนอยู่ในช่วง 0-260 rpm สำหรับกรณีที่เติมและไม่เติม SDS

ซึ่งจะพบว่าตลอดช่วงของ Re ที่ศึกษาการเติม SDS ในปริมาตร 300 mg L^{-1} จะทำให้ k_{La} ลดต่ำลงประมาณ 2-5 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น SDS จึงสามารถใช้เพื่อลดการระเหยของ VOCs ที่การระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลวภายใต้สภาวะที่มีความปั่นป่วนเนื่องจากการกวนได้ดี

5.2.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ k_{Ga} ที่ความเร็วรอบต่างๆ

k_{Ga} สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของเมทานอลจากน้ำตามสมการ (1.9) k_{Ga} ในกรณีที่มีการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg L^{-1} แสดงเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม SDS ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 เปรียบเทียบ $k_G a$ ของเมทานอลที่มีความเร็วรอบของการกวนอยู่ในช่วง 0-260 rpm สำหรับกรณีที่เติมและไม่เติม SDS

พบว่าตลอดช่วงของ Re ที่ศึกษาการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg L⁻¹ จะทำให้ $k_G a$ ลดต่ำลงประมาณ 2-5 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น SDS จึงสามารถใช้เพื่อลดการระเหยของ VOCs ที่การระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊สได้ดี