

การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการระเหยของสารประกอบอินทรีย์
ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำ

The Study of Mass Transfer Coefficient for Volatilization of Volatile Organic Compound
(VOC) from Water Basin



ปรียาภรณ์ ทองสร้อย

Preeyaporn Tongsoy

๑

เลขหมู่	QD 256 ป46 2544 ค.2
Lib Key	211257
	2.6.ล.ย. 2544

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2544

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการระเหย
ของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำ
ผู้เขียน นางสาวปรียาภรณ์ ทองสร้อย
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการที่ปรึกษา
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....กรรมการ
(ดร. จรัญ บุญกาญจน์)

คณะกรรมการสอบ
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

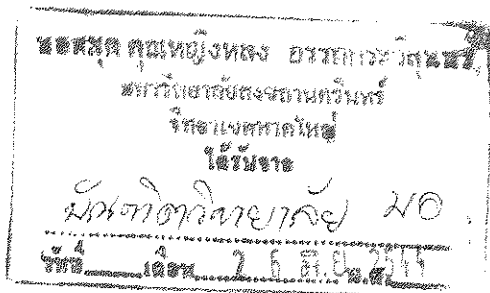
.....กรรมการ
(ดร. จรัญ บุญกาญจน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ อรัญนารถ)

.....กรรมการ
(ดร. ลีอพงษ์ แก้วศรีจันทร์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฎีคุณ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำ
ผู้เขียน	นางสาวปรียาภรณ์ ทองสร้อย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2543

บทคัดย่อ

การระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) จากระบบบำบัดน้ำเสียหรือแหล่งน้ำเปิดอื่นๆ สู่บรรยากาศ สามารถระบุปริมาณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม ซึ่งจะต้องรู้ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G) ในการศึกษานี้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจากการระเหยของทูลอินและเมทานอลจากแหล่งน้ำซึ่งทดลองในถังระเหย ที่สามารถควบคุมความเร็วลมเหนือผิวน้ำและอุณหภูมิของแหล่งน้ำได้ โดยความเร็วลมที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำอยู่ในช่วง $25 - 45^\circ\text{C}$ จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ k_G มีความสัมพันธ์กับความเร็วลมแบบเส้นตรงตลอดช่วงของความเร็วลมที่ศึกษา ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วลมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วง โดยมีจุดการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ความเร็วลมเท่ากับ 2.58 m s^{-1} และพบว่าที่ความเร็วลมคงตัวทั้ง k_L และ k_G มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น

สมการเอมพิริคัลของ k_L และ k_G ถูกพัฒนาจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและปรับเป็นสมการทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของสารอ้างอิงต่อน้ำหนักโมเลกุลของ VOC ที่สนใจศึกษา ยกกำลัง 0.5 เป็นตัวปรับแก้

จากการตรวจสอบความเป็นได้ในการนำเอาสมการเอมพิริคัลของ k_L และ k_G ที่ได้จากการศึกษานี้ไปใช้ร่วมกับทฤษฎีสองฟิล์มเพื่อหาฟลักซ์การระเหย (N_{voc}) และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิฤภาคของเหลว (K_{OL}) ของ VOC อื่นๆภายใต้สภาวะต่างๆ พบว่าค่า N_{voc} และ K_{OL} ที่ทำนายโดยใช้สมการดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดจากการทดลองโดยตรง จึงสรุปได้ว่าสามารถนำสมการเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำเปิดได้

Thesis Title The Study of Mass Transfer Coefficient for Volatilization of
 Volatile Organic Compound (VOC) from Water Basin
Author Miss Preeyaporn Tongsoy
Major Program Chemical Engineering
Academic Year 2000

Abstract

The amount of volatile organic compound evaporated from open water basin can be determined via Two-film Model, Which required the liquid film (k_L) and the gas film mass transfer coefficient (k_G). In this work, k_L and k_G were measured from the volatilization of toluene and methanol from water, respectively. The volatilization experiments were performed using volatilization tank in which both wind speed above water surface and water temperature can be controlled. The wind speed and water temperature in the range of 0 – 4.80 m s⁻¹ and 25 – 45 °C were used in the investigation.

The experimental results suggested that the k_G varied linearly with the wind speed over the wind speed range while the relationship between k_L and wind speed was described by a two linear segments with a discontinuously at 2.58 m s⁻¹. However, both k_L and k_G were increased with increasing water temperature in the same manner.

The empirical equation of k_L and k_G were developed based on experimental data and modified for other VOC using the molecule weight ratio as a correction faction. Finally, the empirical correlations were verified by the comparison of K_{OL} and N_{VOC} obtained from the empirical correlation to the experimental value under several conditions. The K_{OL} and N_{VOC} predicted by these correlations were agree well with the experiential data supporting. The use of the there empirical correlations to the other water basin.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยความกรุณาให้คำปรึกษาเสนอแนวทางและตรวจ
สอบแก้ไขข้อบกพร่องจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศรีต ทองอุไร อาจารย์ที่ปรึกษา และ
ดร. จรัญ บุญกาญจน์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ อรรถนารถ และดร. ลือพงศ์
แก้วศรีจันทร์ ที่ได้ช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัยเรื่อง
นี้ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุ และอุปกรณ์ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณพ่อ แม่ และน้องๆ ที่สนับสนุนให้การศึกษาและเป็นกำลังใจที่สำคัญ ในการทำ
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน

ปรียาภรณ์ ทองสร้อย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(15)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(19)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
ตรวจเอกสาร	2
วัตถุประสงค์	27
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	27
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	28
สารเคมี	28
อุปกรณ์	28
วิธีการทดลอง	29
3. ผลและและวิจารณ์ผลการทดลอง	34
ผลของความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	34
ผลของอุณหภูมิแหล่งน้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	45
สมการเอมพิริคัลของ k_L และ k_G	50
การเปรียบเทียบ K_{OL} ที่ทำนายด้วยสมการเอมพิริคัลกับผลการทดลอง	52
การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ที่ทำนายจากสมการเอมพิริคัลกับผลการทดลอง	55
ผลของปฏิกิริยาต่อกัน (interaction) ระหว่าง VOC	
ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิฤภาคของเหลว (K_{OL})	
และฟลักซ์ของ VOC ที่ระเหยจากแหล่งน้ำ	58
	(6)

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
การระเหยของ VOC ภายใต้สภาวะของความเร็วลมไม่คงตัว	63
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	69
บทสรุป	69
ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก. Calibration curve ของ VOC	76
ภาคผนวก ข. ความเข้มข้นของ VOC จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำ เท่ากับ 25 ± 1 °C	80
ภาคผนวก ค. ความเข้มข้นของ VOC จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	95
ภาคผนวก ง. ความเข้มข้นของ VOC จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน	107
ภาคผนวก จ. ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของ VOC	111
ภาคผนวก ฉ. การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลอง	117
ภาคผนวก ช. การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลอง	122
ภาคผนวก ซ. สมบัติทางกายภาพของ VOC	127
ภาคผนวก ฅ. ตัวอย่างการคำนวณ	130
ประวัติผู้เขียน	135

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1 ค่าคงที่ของสารอินทรีย์ 7 ชนิด ที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง k_d กับอุณหภูมิในสเกล log-log	25
2 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$	81
3 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$	82
4 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$	83
5 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$	84
6 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$	84
7 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$	85
8 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$	85
9 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$	86
10 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$	86
11 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$	87
12 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$	87
13 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$	88

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
14 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$	88
15 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$	89
16 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$	89
17 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$	89
18 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$	90
19 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$	90
20 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$	91
21 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$	91
22 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$	91
23 ความเข้มข้นของทูลอีนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$	92
24 ความเข้มข้นของทูลอีนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$	92
25 ความเข้มข้นของทูลอีนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$	92
26 ความเข้มข้นของทูลอีนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$	93

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
27 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$	93
28 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$	94
29 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่ $U_{10cm} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$	94
30 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30°C	96
31 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35°C	96
32 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40°C	97
33 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45°C	97
34 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30°C	98
35 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35°C	98
36 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40°C	99
37 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45°C	99
38 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25°C	100
39 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30°C	100

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
40 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C	101
41 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C	101
42 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C	102
43 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C	102
44 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C	103
45 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C	103
46 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C	104
47 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C	104
48 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C	105
49 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C	105
50 ความเข้มข้นของทูลีอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C	106
51 ความเข้มข้นของอะซีโตนสำหรับการทดลองที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 31.5 °C	108
52 ความเข้มข้นของอะซีโตนสำหรับการทดลองที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 31.5 °C	108

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
53 ความเข้มข้นของอะซีโตนสำหรับการทดลองที่ $U_{10\text{cm}} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $31.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	109
54 ความเข้มข้นของอะซีโตนสำหรับการทดลองที่ $U_{10\text{cm}} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $33.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	109
55 ความเข้มข้นของอะซีโตนสำหรับการทดลองที่ $U_{10\text{cm}} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $33.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	110
56 ความเข้มข้นของอะซีโตนสำหรับการทดลองที่ $U_{10\text{cm}} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $33.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	110
57 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของเมทานอลจากกระบวนการระเหย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	112
58 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของอะซีโตนจากกระบวนการระเหย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยน และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	112
59 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของคลอโรฟอร์มจากกระบวนการระเหย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยน และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	113
60 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของทูโลอินจากกระบวนการระเหย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	113
61 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของเมทานอลจากกระบวนการระเหย อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	114
62 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของอะซีโตนจากกระบวนการระเหย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	114
63 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของ MEK จากกระบวนการระเหย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	115
64 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของคลอโรฟอร์มจากกระบวนการระเหย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	115
65 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของทูโลอินจากกระบวนการระเหย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	116

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
66 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของอะซีโตนจากระบวนการระเหย ที่ความเร็วลมอุณหภูมิจากแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน	116
67 การเปรียบเทียบระหว่างค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้ จากการทำนายที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	118
68 การเปรียบเทียบระหว่างค่า K_{OL} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้ จากการทำนายที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	118
69 การเปรียบเทียบระหว่างค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้ จากการทำนายที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	119
70 การเปรียบเทียบระหว่างค่า K_{OL} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	119
71 การเปรียบเทียบระหว่างค่า K_{OL} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	120
72 การเปรียบเทียบระหว่างค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้ จากการทำนายที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน	120
73 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากระบวนการระเหย จากแหล่งน้ำในสภาวะเดียวกับ K_{OL} ของอะซีโตนที่ระเหยจากแหล่งน้ำ ภายใต้สภาวะมี VOC อื่นด้วย	121
74 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} ของ MEK ที่ได้จากระบวนการระเหย จากแหล่งน้ำในสภาวะเดียวกับ K_{OL} ของ MEK ที่ระเหยจากแหล่งน้ำ ภายใต้สภาวะมี VOC อื่นด้วย	121
75 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{VOC} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้ จากการทำนายที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	123
76 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{VOC} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ ได้จากการทำนายที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำ เท่ากับ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	123

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
77 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{voc} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	124
78 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{voc} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	124
79 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{voc} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	125
80 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{voc} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน	125
81 การเปรียบเทียบค่า N_{voc} ของอะซีโตนที่ได้จากระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำในสภาวะเดียวกับ N_{voc} ของอะซีโตนที่ระเหยจากแหล่งน้ำภายใต้สภาวะมี VOC อื่นด้วย	126
82 การเปรียบเทียบค่า N_{voc} ของ MEK ที่ได้จากระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำในสภาวะเดียวกับ N_{voc} ของ MEK ที่ระเหยจากแหล่งน้ำภายใต้สภาวะมี VOC อื่นด้วย	127
83 ค่าคงที่ของเฮนรีของ VOC ที่ศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆ	128
84 น้ำหนักโมเลกุลของ VOC	129
85 ความเร็วลมเฉลี่ยเหนือผิวน้ำ 10 cm	129

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะและองค์ประกอบของถังระเหย	29
2 ลักษณะตำแหน่งที่วัดความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ	35
3 ความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำโดยมีค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากับ 1.52 m s^{-1}	35
4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของอะซีโตนที่ความเร็วลมเท่ากับ 4.21 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	36
5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศ (η) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำ (ข) ที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$	38
6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะซีโตนกับเวลาที่ความเร็วลมเท่ากับ 0, 1.52 และ 3.37 m s^{-1}	39
7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_L/C_{L0})$ กับ Time(s) ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0.46, 1.52, 2.58 และ 4.21 m s^{-1}	40
8 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับ $U_{10\text{cm}}$ สำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำ	41
9 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับ $U_{10\text{cm}}$ สำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูง	41
10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L(\text{toluene})$ กับ $U_{10\text{cm}}$ ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	43
11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G(\text{methanol})$ กับ $U_{10\text{cm}}$ ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	44
12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา สำหรับกระบวนการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25, 30 และ $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$	45
13 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับ VOC ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	46
14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L(\text{toluene})$ กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	48
15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G(\text{methanol})$ กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}	49

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
16 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	52
17 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน MEK และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	53
18 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$	54
19 การเปรียบเทียบค่า N_{VOC} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	55
20 การเปรียบเทียบค่า N_{VOC} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน MEK และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	56
21 การเปรียบเทียบค่า N_{VOC} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$	57
22 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่สภาวะเดียวกับค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่สภาวะผสมกับ VOC อื่นๆที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	58

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} ของ MEK ที่สภาวะเดียวกับค่า K_{OL} ของ MEK ที่สภาวะผสมกับ VOC อื่นๆที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	59
24 การเปรียบเทียบค่า N_{VOC} ของอะซีโตน (ก) และของ MEK (ข) ที่สภาวะเดียวกับค่า N_{VOC} ของอะซีโตนและของ MEK ที่สภาวะผสมกับ VOC อื่นๆที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	62
25 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่ศึกษาแบบ I (ก) และแบบ II (ข)	65
26 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกับเวลาสำหรับอะซีโตนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลมไม่คงตัวในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ สำหรับรูปแบบความเร็วลมแบบ I (ก) และแบบ II (ข)	66
27 การเปรียบเทียบค่า N_{VOC} จากการทดลองกับค่า N_{VOC} ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับอะซีโตนจากการระเหยจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลมแบบ I (ก) และแบบ II (ข)	68
28 Calibration curve of Methanol-water solution สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิดีเทคเตอร์ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิโอเวน $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด $2 \mu\text{L}$.	77
29 Calibration curve of Acetone-water solution สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิดีเทคเตอร์ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิโอเวน $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด $2 \mu\text{L}$.	77
30 Calibration curve of MEK-water solution สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิดีเทคเตอร์ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิโอเวน $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด $2 \mu\text{L}$.	78
31 Calibration curve of Chloroform-water solution สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิดีเทคเตอร์ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิโอเวน $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด $2 \mu\text{L}$.	78

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
32 Calibration curve of Toluene-water solution	
สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชั่น 250 °C อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 300 °C	
อุณหภูมิโอเวน 80 °C ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด 2 μ L.	79

ตัวย่อและสัญลักษณ์

ตัวย่อ

A	=	พื้นที่สำหรับการระเหย (L^2)
a, b	=	ค่าคงที่
a_v	=	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สำหรับการระเหยต่อปริมาตร (L^{-1})
$C_{L,t}$	=	ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลา t ($\text{mole } L^{-3}$)
$C_{L,average}$	=	ความเข้มข้นของ VOC เฉลี่ยในแหล่งน้ำ ($\text{mole } L^{-3}$)
$C_{L,f}$	=	ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาสุดท้ายสำหรับการระเหย ($\text{mole } L^{-3}$)
$C_{L,0}$	=	ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาเริ่มต้นการทดลอง ($\text{mole } L^{-3}$)
D_G, D_L	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในวัฏภาคแก๊สและในวัฏภาคของเหลว ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
D_{l-air}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในวัฏภาคแก๊ส ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
$D_{VOC-gas}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคแก๊ส ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
$D_{VOC,ref-gas}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC อ้างอิงในวัฏภาคแก๊ส ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
$D_{VO-,liquid}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคของเหลว ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
$D_{VOC,ref-liquid}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC อ้างอิงในวัฏภาคของเหลว ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
D_{w-air}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวัฏภาคแก๊ส ($L^2 \text{ } \ominus^{-1}$)
d_p	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของ aerator (L)
F/D	=	อัตราส่วนระหว่างเส้นทแยงมุมของถังระเหยต่อความลึกของแหล่งน้ำ (ไม่มีหน่วย)
Fr	=	Froude number (ไม่มีหน่วย)
g	=	ค่าคงที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วง ($L \text{ } \ominus^{-2}$)
H	=	ค่าคงที่ของเฮนรี ($\text{atm } L^{-3} \text{ mole}^{-1}$)
J	=	อัตราการถ่ายโอนมวลออกซิเจนของ aerator ($M L^{-1} \text{ } \ominus^{-1}$)
K_{OL}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
k	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
k_G	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
k_L	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
MW	=	น้ำหนักโมเลกุลของสาร ($M \text{ mole}^{-1}$)
m	=	หน่วยของความยาว (L)
N_p	=	power number (ไม่มีหน่วย)

N_{voc}	=	ฟลักซ์การระเหยของ VOC ($\text{mole L}^{-2} \ominus^{-1}$)
n	=	สัมประสิทธิ์
P_0	=	กำลังที่ให้แก่อerator ($\text{F L} \ominus^{-1}$)
R	=	ค่าคงที่สากลของแก๊ส ($\text{atm L}^3 \text{mole}^{-1} \text{T}^{-1}$)
Re	=	Reynolds number (ไม่มีหน่วย)
Sc	=	Schmidt number (ไม่มีหน่วย)
s	=	หน่วยของเวลา (\ominus)
T	=	อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (T)
t	=	เวลาสำหรับการระเหย (\ominus)
U_{average}	=	ความเร็วเฉลี่ย ($\text{L} \ominus^{-1}$)
U^*	=	ความเร็วลม ($\text{L} \ominus^{-1}$)
$U_{0.075}$	=	ความเร็วลมที่ระยะ 0.075 m เหนือผิวน้ำ ($\text{L} \ominus^{-1}$)
U_{10}	=	ความเร็วลมที่ระยะ 10 m เหนือผิวน้ำ ($\text{L} \ominus^{-1}$)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (L^3)
VOC	=	volatile organic compound

สัญลักษณ์

δ_G, δ_L	=	ความหนาของชั้นฟิล์ม (L)
τ	=	Average residence time (\ominus)
μ_G, μ_L	=	ความหนืดของสารในวัฏภาคแก๊สและของวัฏภาคของเหลวตามลำดับ ($\text{M L}^{-1} \ominus^{-1}$)
ρ_G, ρ_L	=	ความหนาแน่นของสารในวัฏภาคแก๊สและของวัฏภาคของเหลวตามลำดับ (M L^{-3})
ω	=	ความเร็วรอบของ aerator (rpm)

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound, VOC) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม สัดส่วนส่วนหนึ่งของกระบวนการ VOC จะถูกถ่ายเทไปยังปอบำบัดน้ำเสียหรือแหล่งน้ำเปิดพร้อมกับของเสียอื่นๆ ซึ่งกระบวนการระเหยของ VOC จากแหล่งดังกล่าวจัดเป็นสาเหตุหลักอันหนึ่งของการเกิดมลภาวะทางอากาศและเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน (Roberts, *et al.*, 1984; Berglund, *et al.*, 1987; Chrysikopoulo, *et al.*, 1992; Liao and Lee, 1997; Brida and Kee Ong, 1998; Dewulf, *et al.*, 1998; Langenheve, *et al.*, 1998; Chern and Yu, 1999; Olson, *et al.*, 2000) โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกาและแคนาดาซึ่งมีการศึกษาปัญหานี้อย่างจริงจังและมีความพยายามหาวิธีการตรวจวัด ทำนาย รวมทั้งควบคุมและป้องกันการระเหยของ VOC จากกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานต่างอย่างจริงจัง อย่างเช่นโรงงานอุตสาหกรรมในสหรัฐอเมริกาจะต้องรายงานปริมาณของสารอินทรีย์ที่ระเหยสู่บรรยากาศต่อ Environmental Protection Agency (EPA) ทุกปี แต่สำหรับประเทศไทยปัญหาดังกล่าวไม่ได้ได้รับความสนใจจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมากนัก

กระบวนการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นในแหล่งน้ำและวัฏภาคแก๊ส และมีปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมให้ VOC ถูกถ่ายโอนจากแหล่งน้ำเปิดสู่บรรยากาศได้รวดเร็วขึ้น ได้แก่ อุณหภูมิของแหล่งน้ำ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วลมที่พัดผ่านผิวน้ำ ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบุปริมาณของ VOC ที่ระเหยสู่บรรยากาศได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะพัฒนาวิธีการสำหรับการประมาณการระเหยของ VOC โดยคำนึงถึงอิทธิพลของความเร็วมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นปัจจัยหลัก วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้คือ การคำนวณค่าฟลักซ์การระเหยของ VOC (N_{VOC}) จากแหล่งน้ำเปิดโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory) ของ Whitman (1924) ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวถูกนำมาใช้กับแหล่งน้ำเปิดครั้งแรกโดย Liss and Slater (1974) และจากทฤษฎีนี้ค่าฟลักซ์แปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว (K_{OL}) ซึ่งค่า K_{OL} เป็นฟังก์ชันกับค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_g) ค่าสัมประสิทธิ์ของเหลว (k_L)

และค่าคงที่ของเฮนรี่ (H) ดังนั้น k_G และ k_L จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการหาค่าฟลักซ์ของ VOC

ได้มีการศึกษา k_G และ k_L สำหรับแหล่งน้ำเปิดทั่วไปไว้มากพอสมควรทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในภาคสนามซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือแบบจำลองตามแนวความคิด และแบบสมการเอ็มพิริคัลซึ่งอยู่บนพื้นฐานการทดลอง โดยแบบจำลองตามแนวความคิดจัดเป็นความพยายามแรกๆ ที่จะอธิบายให้เข้าใจถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล แต่พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้น k_G และ k_L ส่วนใหญ่ที่ใช้ในกรณีนี้จึงอยู่ในรูปแบบของสมการเอ็มพิริคัล ซึ่งพัฒนามาจากทดลอง โดยจะเน้นปัจจัยทางธรรมชาติที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะความเร็วลม สำหรับ k_G ส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาจากการระเหยน้ำ (Liss and Slater, 1974; Munnich, et al., 1978; Mackay and Yeun, 1983; Bunyakan, 1998) และปรับแก้เป็นสมการสำหรับ VOC ทั่วไปโดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของของน้ำต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ที่สนใจ และจากการตรวจเอกสารพบว่ามีข้อจำกัดเนื่องจากสมบัติทางกายภาพของน้ำ และของ VOC แตกต่างกัน ส่วน k_L นั้นส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาจากกระบวนการปลดปล่อยของแก๊สต่างๆ เช่น SF_6 , N_2O , CH_4 , CO_2 และ O_2 (Tans, et al., 1990, Wanninkhof and Bliven, 1991) และปรับแก้เป็นสมการทั่วไปโดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สอ้างอิงต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ที่สนใจเช่นเดียวกับในกรณีของค่า k_G

ตรวจเอกสาร

1. ทฤษฎีสองฟิล์มและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

กระบวนการระเหย เป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลของสาร จากแหล่งน้ำผ่านผิวสัมผัสระหว่างแหล่งน้ำและอากาศ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มของ Whitman (1924) โดยสมมุติว่า ภูมิภาคของเหลวซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและแยกจากภูมิภาคอากาศโดยชั้นฟิล์มบางๆ ของของเหลวและของอากาศ ซึ่งการถ่ายโอนมวลเกิดโดยการแพร่ของโมเลกุลข้ามผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคทั้งสองและสมมุติว่าที่ผิวสัมผัสอยู่ในสภาวะคงตัว

สำหรับกระบวนการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compound) จากแหล่งน้ำ ค่าฟลักซ์ของ VOC ที่เวลาใดๆ ($N_{voc,t}$) สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$N_{VOC,t} = K_{OL} \left(C_{L,t} - \frac{HC_{G,t}}{RT} \right) \quad (1.1)$$

เมื่อ $N_{VOC,t}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่เวลา t ($\text{mole L}^{-2} \text{ } \ominus^{-1}$)

K_{OL} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว ($\text{L } \ominus^{-1}$)

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลา t (mole L^{-3})

$C_{G,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคแก๊สที่เวลา t (mole L^{-3})

H = ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant, $\text{atm L}^{-3} \text{ mole}^{-1}$)

R = ค่าคงที่สากลของแก๊ส (Universal gas constant, $\text{atm L}^3 \text{ mole}^{-1} \text{ T}^{-1}$)

จากทฤษฎีสองฟิล์ม (สมการ (1.1)) จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับแหล่งน้ำ (K_{OL}) มีความสัมพันธ์อยู่กับสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G) และค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant, H) ดังสมการ

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_L} + \frac{RT}{Hk_G} \quad (1.2)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($\text{L } \ominus^{-1}$)

k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($\text{L } \ominus^{-1}$)

H = ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant, $\text{atm L}^{-3} \text{ mole}^{-1}$)

R = ค่าคงที่สากลของแก๊ส (Universal gas constant, $\text{atm L}^3 \text{ mole}^{-1} \text{ T}^{-1}$)

T = อุณหภูมิของน้ำ (T)

สำหรับกรณีที่มีกระแสลมพัดผ่านผิวน้ำ กระแสลมจะพัดพาเอา VOC ออกไปกับกระแสลมในทันทีที่มันระเหยขึ้นมาแหล่งน้ำ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วพบว่าความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคแก๊ส (C_G) จะมีค่าน้อยมากๆ หรือประมาณได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (1.1) จะลดรูปเป็น

$$N_{VOC,t} = K_{OL} C_{L,t} \quad (1.3)$$

เมื่อ $N_{VOC,t}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่เวลา t ($\text{mole L}^{-2} \text{ } \ominus^{-1}$)

K_{OL} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว ($\text{L } \ominus^{-1}$)

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลา t (mole L^{-3})

ซึ่งค่าฟลักซ์ของ VOC ที่เวลาใดๆ ($N_{VOC,t}$) สำหรับกระบวนการระเหยของ VOC ที่สามารถสมมุติได้ว่าปริมาตรของสารละลายมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการระเหย (เช่นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรรวม) สามารถหาได้จากการทำดุลมวลรอบถังระเหยจะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง $N_{VOC,t}$, พื้นที่ผิวของการระเหย A, ปริมาตรของสารละลาย V, ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำ $C_{L,t}$ และเวลา t ดังสมการ

$$N_{VOC,t} = -\frac{V}{A} \frac{dC_{L,t}}{dt} \quad (1.4)$$

เมื่อ $N_{VOC,t}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่เวลา t (mole L⁻² Ⓣ⁻¹)

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลา t (mole L⁻³)

V = ปริมาตรของสารละลาย (L³)

A = พื้นที่ผิวของการระเหย (L²)

t = เวลาที่ใช้สำหรับการระเหย (Ⓣ)

รวมสมการ (1.3) และ สมการ (1.4) จะได้

$$\frac{dC_{L,t}}{dt} = -\frac{K_{OL}AC_{L,t}}{V} \quad (1.5)$$

อินทิเกรตสมการ (1.5) จากเวลาเท่ากับศูนย์ ที่ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำเท่ากับ $C_{L,o}$ ถึงเวลา t ใดๆ ที่ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำเท่ากับ $C_{L,t}$ จะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาใดๆ ดังสมการ

$$\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,o}} = -K_{OL}a_v t \quad (1.6)$$

เมื่อ $a_v = \frac{A}{V}$ = อัตราส่วนของพื้นที่ผิวของการระเหยต่อปริมาตรของสารละลาย (L⁻¹)

จากสมการ (1.6) จะพบว่าเราสามารถที่จะหา K_{OL} ของแต่ละการทดลองที่สภาวะต่างๆได้

จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,o}}$ กับ t ของการทดลองนั้นๆและค่า K_{OL} คือ

$$K_{OL} = -\frac{Slope}{a_V} \quad (1.7)$$

เมื่อทราบ K_{OL} สามารถหาค่าฟลักซ์ของ VOC ที่สนใจที่เวลาต่างๆได้จากผลคูณของ K_{OL} กับความเข้มข้นของ VOC ในบรรยากาศของเหลวในขณะนั้นตามสมการ (1.3) ส่วนค่าฟลักซ์เฉลี่ยตลอดกระบวนการระเหยของ VOC ($N_{VOC,average}$) ในแต่ละการทดลอง ก็สามารถคำนวณได้จากสมการ (1.3) เช่นกันเพียงแต่ต้องใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยแทนความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ดังสมการ

$$N_{VOC,average} = K_{OL} C_{L,average} \quad (1.8)$$

เมื่อ $N_{VOC,average}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่เวลา t ($\text{mole L}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

K_{OL} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับบรรยากาศของเหลว (L s^{-1})

$C_{L,average}$ = ความเข้มข้นของ VOC แบบเฉลี่ยในแหล่งน้ำ (mole L^{-3})

เนื่องจากความเข้มข้นของ VOC ในกระบวนการระเหยแบบไม่คงตัว มีรูปแบบการลดลงเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นการเฉลี่ยของความเข้มข้นแบบ log mean average จึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสม สมการ (1.8) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$N_{VOC,average} = K_{OL} \frac{(C_{L,f} - C_{L,o})}{\ln \frac{C_{L,f}}{C_{L,o}}} \quad (1.9)$$

เมื่อ $N_{VOC,average}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่เวลา t ($\text{mole L}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

K_{OL} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับบรรยากาศของเหลว (L s^{-1})

$C_{L,f}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาสุดท้าย (mole L^{-3})

$C_{L,o}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาเริ่มต้น (mole L^{-3})

นอกจากวิธีการคำนวณตามสมการ (1.9) แล้วค่าฟลักซ์เฉลี่ยตลอดกระบวนการระเหยของ VOC ยังสามารถหาได้จากการทดลองโดยตรงจากความเข้มข้นเริ่มต้น และความเข้มข้นสุดท้ายดังสมการ

$$N_{VOC,average} = \frac{C_{L,f} - C_{L,o}}{a_v t_f} \quad (1.10)$$

เมื่อ $N_{VOC,average}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่เวลา t ($\text{mole L}^{-2} \text{ } \ominus^{-1}$)

$C_{L,f}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาสุดท้าย (mole L^{-3})

$C_{L,o}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในแหล่งน้ำที่เวลาเริ่มต้น (mole L^{-3})

a_v = อัตราส่วนของพื้นที่ผิวของการระเหยต่อปริมาตรของสารละลาย (L^{-1})

t_f = เวลาสุดท้ายสำหรับการระเหย (\ominus)

ดังนั้นโดยการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ที่ทำนายโดยใช้ K_{OL} ตามสมการ (1.9) กับค่าฟลักซ์ที่วัดได้โดยตรงตามสมการ (1.10) ก็จะสามารถตรวจสอบความถูกต้องของค่า K_{OL} ได้

2. การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G)

2.1 สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของ VOC ที่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลว VOC เหล่านี้จะมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำซึ่งก็คือ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงนั่นเอง ซึ่งเมื่อ H มีค่าสูงๆเทอมขวามือสุดของสมการ (1.2) จะสามารถประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการ (1.2) สามารถลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_L} \quad (1.11)$$

นั่นคือสำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงจะได้ว่า K_{OL} ที่วัดได้จากการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำก็คือ k_L ของ VOC นั้นนั่นเอง ซึ่ง Mackay (1989) พบว่า VOC ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงกว่าหรือเท่ากับ $5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$ โดย Mackay (1989) พบว่าความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลของ VOC กลุ่มนี้จะอยู่ในวัฏภาคของของเหลวมากกว่า 90% ขึ้นไป ตัวอย่างของ VOC ในกลุ่มนี้ได้แก่ ทูโลอิน และ เบนซีน ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรี่ที่ $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ เป็น 6.64×10^{-3} และ $5.5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$ ตามลำดับ โดยในการศึกษาี้จะเลือกวัด k_L จากการระเหยของทูโลอินจากแหล่งน้ำ เพราะทูโลอินเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

2.2 สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G) สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์ ทั้งนี้ เพราะในกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จะไม่มีเกรเดียนต์ของความเข้มข้นเกิดขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จึงอยู่ในวัฏภาคแก๊สทั้งหมด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการทดลองระเหยสารบริสุทธิ์ในถังระเหยขนาดใหญ่และมีกระแสลมพัดผ่านนั้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะกระทำได้ จึงต้องศึกษาหา k_G จากกระบวนการระเหยของสารประกอบที่ระเหยได้จาก วัฏภาคของเหลวแทน โดยใช้สารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ซึ่งก็คือสารที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำๆนั่นเอง ซึ่งเมื่อ H มีค่าต่ำมากๆ เอมขวามือสุดของสมการ (1.2) จะมีค่าสูงกว่าเทอมแรกมากๆ ดังนั้นสมการ (1.2) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{RT}{Hk_G}$$

$$\text{หรือ } k_G = \frac{RTK_{OL}}{H} \quad (1.12)$$

นั่นคือเราสามารถวัด k_G ได้จากการวัด K_{OL} จากกระบวนการระเหยของสารละลาย ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำๆ นั่นเอง ซึ่ง Mackay (1989) พบว่าสารที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ สารที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำกว่าหรือเท่ากับ $5 \times 10^{-6} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ซึ่งความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลของ VOC กลุ่มนี้จะอยู่ในวัฏภาคแก๊สมากกว่า 90% ขึ้นไป ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ได้แก่ เมทานอล ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรีที่ 25°C เป็น $3.77 \times 10^{-6} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ดังนั้นการศึกษานี้จะเลือกวัด k_G จากกระบวนการระเหยของเมทานอลจากวัฏภาคของเหลวเพราะเมทานอลเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

สำหรับสารประกอบอินทรีย์และ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีอยู่ระหว่าง 5×10^{-6} - $5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลจะมีอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจะสามารถวัดได้เฉพาะ K_{OL} เท่านั้นโดยเราจะไม่สามารถวัด k_G และ k_L ของ VOC ในกลุ่มนี้ได้เลย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีวิธีที่ใช้ทำนายหรือประมาณ k_G และ k_L สำหรับ VOC เหล่านี้ได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติที่สำคัญๆของสาร เช่น น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion Coefficient) เป็นตัวปรับแก้ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3. สมการของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

สมการของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_c และ k_g) มีรายงานไว้ในสองรูปแบบ คือแบบจำลองตามแนวความคิด และแบบจำลองที่เป็นสมการเอ็มพิริคัล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการทดลอง

3.1 แบบจำลองตามแนวความคิด (Conceptual model)

แบบจำลองตามแนวความคิด จัดเป็นความพยายามแรกๆ ที่จะอธิบายให้เห็นถึงภาพพจน์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ซึ่งแบบจำลองตามแนวความคิดประกอบด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม ทฤษฎีการเปลี่ยนผิว ทฤษฎีชั้นขอบเขต ทฤษฎีการทะลุทะลวง

3.1.1 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film model)

ทฤษฎีสองฟิล์ม เสนอโดย Whitman (1924) โดยสมมุติว่ามีฟิล์มนิ่ง (stagnant film) 2 ฟิล์มอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของแหล่งน้ำและบรรยากาศอากาศ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลวหนึ่ง คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม ดังสมการ

$$k_G = \frac{D_G}{\delta_G}$$

$$\text{และ } k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \quad (1.13)$$

เมื่อ k_G, k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวตามลำดับ ($L \ominus^{-1}$)

D_G, D_L = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สและแหล่งน้ำตามลำดับ ($L^2 \ominus^{-1}$)

δ = ความหนาของฟิล์ม (L)

ทฤษฎีสองฟิล์ม ทำนายว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนแปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของสารประกอบ อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับลักษณะของสิ่งแวดล้อม อย่างเช่นความเร็วลม ความหนืด ความหนาแน่นและอุณหภูมิของเหลว ซึ่งจะมีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม

Chern and Yu (1999) ได้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในกระบวนการระเหยของ VOC จากระบบบำบัดน้ำเสียจำลองโดยใช้ถังเติมอากาศขนาด 500 ลิตร ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.83 เมตร และสูง 1.2 เมตร จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยทฤษฎีสองฟิล์มและ ASCE-based model (American Society of Civil) พบว่าการทำนายด้วย

ทฤษฎีสองฟิล์มให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองในขณะที่ ASCE-based model ให้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

3.1.2 ทฤษฎีการทะลุทะลวง (Penetration theory)

Herbie (1935) เป็นคนแรกที่เสนอทฤษฎีนี้ขึ้นมาเพื่อให้อธิบายอัตราชั่วครู่ของการแพร่เข้าสู่ของไหลที่ค่อนข้างหนาซึ่งความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสคงที่โดยสมมุติว่ากระแสวนจากของไหลบัคเคิลปั่นป่วนเข้ามายังบริเวณผิวสัมผัส โดยโมเลกุลที่แพร่จะเคลื่อนที่ไปไม่ถึงอีกด้านของชั้นบางๆ หากเวลาสัมผัสสั้นที่สภาวะไม่คงตัว จะได้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลดังสมการ (1.14) ซึ่งทฤษฎีนี้ทำนายว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่

$$k = 2\sqrt{\frac{D}{\pi t}} \quad (1.14)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($L \ominus^{-1}$)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล ($L^2 \ominus^{-1}$)

t = เวลา (average exposure time (\ominus))

3.1.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนผิว (Surface Renewal theory)

ทฤษฎีการเปลี่ยนผิวปรับปรุงมาจากทฤษฎีการทะลุทะลวงโดย Danckwerts (1951) ซึ่งจะพิจารณาในกรณีที่มีชิ้นส่วนของของไหล (fluid element) ที่ผิวถูกแทนที่ด้วยของไหลใหม่จากกระแสบัคเคิล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแสดงดังสมการ (1.20) ทฤษฎีนี้ทำนายว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล ถึงแม้ว่าในทางกายภาพทฤษฎีนี้จะใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากกว่าทฤษฎีสองฟิล์ม แต่ก็ไม่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง

$$k = \sqrt{D\tau} \quad (1.15)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($L \ominus^{-1}$)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล ($L^2 \ominus^{-1}$)

τ = average residence time for an element in the interface (\ominus)

3.1.4 ทฤษฎีชั้นขอบเขต (Boundary layer theory)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากทฤษฎีชั้นขอบเขตจะคล้ายคลึงกับการศึกษาในเรื่องกลศาสตร์ของไหล และการถ่ายโอนความร้อนผ่านแผ่นเพลทบางๆ (flute plate) นั่นคือเมื่อขอบเขตอยู่ในช่วงลามินาร์ซึ่งมีเลข Reynolds น้อยกว่า 3×10^5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลหาได้จากสมการ

$$\frac{k_L}{D} = 0.626 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}} \quad (1.16)$$

สำหรับการไหลในช่วงปั่นป่วนจะเกิดขึ้นจริงเมื่อเลข Reynolds มีค่ามากกว่า 5×10^5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถคำนวณโดยใช้ Chilton - Colburn analogy แสดงดังสมการ

$$\frac{k_L}{D} = 0.373 \text{Sc}^{\frac{1}{3}} (\text{Re}^{0.8} - 15500) \quad (1.17)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($L \cdot \Theta^{-1}$)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล ($L^2 \cdot \Theta^{-1}$)

L = ความยาวของเพลทบาง (L)

Re = เลข Reynolds (ไม่มีหน่วย)

Sc = เลข Schmidt (ไม่มีหน่วย)

Bunyakana (1998) พบว่าความสัมพันธ์เหล่านี้ทำนาย k_L และ k_G ผิดพลาดมากเมื่อเทียบกับผลการทดลองเพราะว่าสมการเหล่านี้พัฒนาขึ้นมาจากการสมมุติให้การถ่ายโอนมวลเกิดบนวัสดุผิวเรียบ

3.2 แบบจำลองสมการเอ็มพิริคัล

ถึงแม้ว่าแบบจำลองตามแนวความคิด ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เข้าใจการถ่ายโอนมวลที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค แต่โดยทั่วไปแล้วไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานจริง เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง ในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ใช้กันอยู่ส่วนมากจะอยู่ในรูปสมการเอ็มพิริคัล (Harbeck, 1962; Mackay and Yean, 1983; Schwarzenback, *et al.*, 1998 Lunney, *et al.*, 1985)

4. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติของโมเลกุล

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับน้ำหนักโมเลกุล

โดยกฎการแพร่ของแกรแฮม (Graham's law of diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะให้แปรเปลี่ยนกับน้ำหนักโมเลกุลดังสมการ (Rathbun and Tai, 1983)

$$k = bM^{-0.5} \quad (1.18)$$

จากสมการ (1.18) จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับน้ำหนักโมเลกุลของ VOC ได้ดังนี้

$$k_L = b_L M^{-0.5} \quad (1.19)$$

$$\text{และ } k_G = b_G M^{-0.5} \quad (1.20)$$

เมื่อ k_L = ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($L \ominus^{-1}$)

k_G = ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($L \ominus^{-1}$)

b_L, b_G = ค่าคงที่

M = น้ำหนักโมเลกุล ($M \text{ mole}^{-1}$)

สมการ (1.19) ถึงสมการ (1.20) ทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G ของ VOC หนึ่งที่ต้องการหาค่ากับ k_L และ k_G ของอีก VOC หนึ่งที่ใช้เป็นสารอ้างอิงได้ดังสมการ (1.21) ถึงสมการ (1.22)

$$k_L(VOC) = k_L(VOC, ref) \left(\frac{M_{VOC, ref}}{M_{VOC}} \right)^{1/2} \quad (1.21)$$

$$k_G(VOC) = k_G(VOC, ref) \left(\frac{M_{VOC, ref}}{M_{VOC}} \right)^{1/2} \quad (1.22)$$

เมื่อ $k_L(\text{VOC})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ($L \ominus^{-1}$)
$k_G(\text{VOC})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ($L \ominus^{-1}$)
$k_L(\text{VOC, ref})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง ($L \ominus^{-1}$)
$k_G(\text{VOC, ref})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง ($L \ominus^{-1}$)
$M_{\text{VOC, ref}}$	= น้ำหนักโมเลกุลของ VOC อ้างอิง ($M \text{ mole}^{-1}$)
M_{VOC}	= น้ำหนักโมเลกุลของ VOC ($M \text{ mole}^{-1}$)

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่

โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะถูกสมมติให้แปรเปลี่ยนกับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังสมการ

$$k = aD^n \quad (1.23)$$

เมื่อ k	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสาร ($L \ominus^{-1}$)
a	= ค่าคงที่
D	= สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, $L^2 \ominus^{-1}$)
n	= สัมประสิทธิ์ (coefficient)

โดยค่าของ n ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้ คือ ตามแบบจำลองสองฟิล์ม (two-film model) ของ Lewis และ Whitman (1924) ค่า n จะเท่ากับ 1.0 ตามแบบจำลอง การทะลวง (Penetration model) ของ Danckwerts (1951) ค่า n จะเท่ากับ 0.5 และแบบจำลอง ฟิล์ม-การทะลวง (film-penetration) ของ Dobbins (1964) กำหนดให้ n ขึ้นอยู่กับสภาวะของการผสมโดย n จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 สำหรับสภาวะการผสมที่ดี (high mixing conditions) ถึง $n = 1.0$ สำหรับสภาวะที่มีการผสมต่ำ (Low mixing) จากหลักการของความเหมือนระหว่างการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer-mass transfer analogy) ของ Sherwood และ Pigford (1952) จะได้ว่า n มีค่าเท่ากับ 0.667 ในขณะที่ข้อมูลที่รวบรวมโดย Merchuk (1978) พบว่าจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1.0 และจากการทดลองจริงโดย Merchuk (1952) เองพบว่าข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองดีที่สุดเมื่อ $n = 0.684$ แต่อย่างไรก็ตาม $n = 0.684$ นี้เหมาะสำหรับการระเหยของของเหลวบริสุทธิ์ซึ่งมีการเคลื่อนไหวของบัลด์มาก สำหรับการระเหยของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำดังเช่นที่พบในทางสิ่งแวดล้อมนั้น Tamir และคณะ (1979) แนะนำว่าค่า

n ที่เหมาะสมควรจะเป็น 0.632 ในขณะที่ Gilland and Sherwood ทำการทดลองการระเหยของเหลว 9 ชนิด ใน wet-wall column โดยให้อากาศไหลแบบปั่นป่วน และได้รายงานค่า $n = 0.56$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่พบโดย Dewulf, *et al.* (1998) ซึ่งพบว่าค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ โดยอยู่ในช่วง 0.50-0.65 ในขณะที่ Rathbun and Tai (1983) พบว่าค่า $n = 0.568$ ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย

จากสมการ (1.23) จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ได้ดังนี้

$$k_L = a_L D_L^n \quad (1.24)$$

$$\text{และ } k_G = a_G D_G^n \quad (1.25)$$

- เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($L \ominus^{-1}$)
 k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($L \ominus^{-1}$)
 a_L, a_G = ค่าคงที่
 D_L = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของเหลว ($L^2 \ominus^{-1}$)
 D_G = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคแก๊ส ($L^2 \ominus^{-1}$)

สมการ (1.24) ถึงสมการ (1.25) ทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G ของ VOC หนึ่งที่ต้องการหากับ k_L และ k_G ของอีก VOC หนึ่งที่ใช้เป็นสารอ้างอิงได้ดังสมการ (1.26) ถึงสมการ (1.27)

$$k_L(VOC) = k_L(VOC, ref) \left(\frac{D_{VOC-Liquid}}{D_{VOC,ref-Liquid}} \right)^n \quad (1.26)$$

$$k_G(VOC) = k_G(VOC, ref) \left(\frac{D_{VOC-gas}}{D_{VOC,ref-gas}} \right)^n \quad (1.27)$$

- เมื่อ $k_L(VOC)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ($L \ominus^{-1}$)
 $k_G(VOC)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ($L \ominus^{-1}$)
 $k_L(VOC, ref)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง ($L \ominus^{-1}$)

$$\begin{aligned}
 k_G(\text{VOC, ref}) &= \text{สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง (L \text{ \textcircled{1}})} \\
 D_{\text{VOC-gas}} &= \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคแก๊ส (L^2 \text{ \textcircled{1}})} \\
 D_{\text{VOC, ref-gas}} &= \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC อ้างอิงในวัฏภาคแก๊ส (L^2 \text{ \textcircled{1}})}
 \end{aligned}$$

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับตัวเลขของ Schmidt (Schmidt number)

จากการตรวจสอบเอกสารโดย Mackay and Yeun (1983) แนะนำว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารประกอบใดๆจะแปรผันโดยตรงกับตัวเลขของ Schmidt ยกกำลัง -0.67 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารประกอบใดๆสามารถปรับแก้สำหรับสารประกอบอื่นๆโดยใช้ Schmidt เป็นตัวปรับแก้ได้ดังนี้

$$k_L = c_L S_{CL}^{-0.67} \quad (1.28)$$

$$\text{และ } k_G = c_G S_{CG}^{-0.67} \quad (1.29)$$

$$\text{เมื่อ } k_L = \text{สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (L \text{ \textcircled{1}})}$$

$$k_G = \text{สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (L \text{ \textcircled{1}})}$$

$$c_L, c_G = \text{ค่าคงที่}$$

$$S_{CL} = \frac{\mu_L}{D_L \rho_L} = \text{ตัวเลข Schmidt ในวัฏภาคของเหลว (ไม่มีหน่วย)}$$

$$S_{CG} = \frac{\mu_G}{D_G \rho_G} = \text{ตัวเลข Schmidt ในวัฏภาคแก๊ส (ไม่มีหน่วย)}$$

สมการ (1.28) ถึงสมการ (1.29) ทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G ของ VOC หนึ่งที่ต้องการหาค่ากับ k_L และ k_G ของอีก VOC หนึ่งที่ใช้เป็นสารอ้างอิงได้ดังสมการ (1.30) ถึงสมการ (1.31)

$$k_L(\text{VOC}) = k_L(\text{VOC, ref}) \left(\frac{S_{CL\text{VOC}}}{S_{CL\text{VOC, ref}}} \right)^{-0.67} \quad (1.30)$$

$$k_G(\text{VOC}) = k_G(\text{VOC, ref}) \left(\frac{S_{CG\text{VOC}}}{S_{CG\text{VOC, ref}}} \right)^{-0.67} \quad (1.31)$$

เมื่อ $k_L(\text{VOC})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
$k_G(\text{VOC})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
$k_L(\text{VOC, ref})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
$k_G(\text{VOC, ref})$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง ($L \text{ } \ominus^{-1}$)
Sc_L	= ตัวเลขของ Schmidt ในวัฏภาคของเหลว (ไม่มีหน่วย)
Sc_G	= ตัวเลขของ Schmidt ในวัฏภาคแก๊ส (ไม่มีหน่วย)

ความสัมพันธ์ตามสมการ (1.21) ถึงสมการ (1.22), สมการ (1.26) ถึงสมการ (1.27) และสมการ (1.30) ถึงสมการ (1.31) จะช่วยให้เราสามารถทำนาย k_L และ k_G ของ VOC ได้ที่ต้องการได้ ซึ่งก็จะสามารถทำนาย K_{OL} ของ VOC ได้ได้จาก k_G และ k_L ตามสมการ (1.2) และสามารถหาค่า N_{VOC} ของ VOC ที่สนใจได้ในที่สุด ตามสมการที่ (1.9)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Harbeck (1962)

ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับความเร็วลมและพื้นที่ผิวสำหรับการระเหยโดยการทดลองการระเหยน้ำในอ่างเก็บน้ำที่มีพื้นที่ผิวสำหรับการระเหยแตกต่างกันที่ความเร็วลมต่างๆ พบว่า k_G ขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วลมและพื้นที่ผิวของอ่างยกกำลัง -0.05 และนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาเป็นสมการเอมพิริคัลเพื่อใช้ทำนาย k_G ของสารประกอบอินทรีย์หรือ VOC อื่นได้โดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเป็นตัวปรับแก้ดังสมการ

$$k_G = 3.0 \times 10^{-2} \left(\frac{D_{i-\text{air}}}{D_{w-\text{air}}} \right) U_s A_r^{-0.05} \quad (1.32)$$

เมื่อ k_G	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (cm s^{-1})
U_s	= ความเร็วลมเหนือผิวน้ำ (ft s^{-1})
A_r	= พื้นที่ผิวน้ำ (acres)
$D_{i-\text{air}}$	= สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบ i ในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)
$D_{w-\text{air}}$	= สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบน้ำในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

Mackay and Yeun (1983)

ศึกษาการระเหยของน้ำภายในอุโมงค์ลม ขนาด 6 m. x 6 m. x 0.60 m. โดยทำการทดลองที่ความเร็วลมในช่วง 5.6 - 13.2 m s⁻¹ พบว่า k_G มีความสัมพันธ์กับ friction velocity แบบเชิงเส้น และสามารถหา k_G ของ VOC อื่นได้โดยใช้เลข Schmidt เป็นตัวปรับแก้ดังสมการ (1.33) และพบว่าสมการนี้ใช้ได้ดีสำหรับที่ที่มีความเร็วลมสูงๆ (5.6 - 13.2 m s⁻¹) จะนำไปใช้กับสภาพแวดล้อมจริงไม่ได้เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า 5 m s⁻¹

$$k_G = 1 \times 10^{-3} + 46.2 \times U^* Sc_G^{-0.67} \quad (1.33)$$

$$U^* = 0.01(6.1 + 0.63U_{10})^{0.5} U_{10} \quad \text{สำหรับสภาพแวดล้อม} \quad (1.34)$$

$$U = 2.0 \times 10^{-2} U_\alpha^{1.5} \quad \text{สำหรับห้องปฏิบัติการ} \quad (1.35)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (cm s⁻¹)

U^* = friction velocity (m s⁻¹)

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวหน้า 10 เมตร (m s⁻¹)

U_α = ความเร็วลม (m s⁻¹)

Schwarzenback, *et al.* (1993)

ได้ศึกษา k_G จากการศึกษาการระเหยของน้ำทั้งในอุโมงค์ลมและในภาคสนามพบว่าผลที่ได้จากการศึกษาสอดคล้องกับผลการวิจัยของนักวิจัยอื่นๆ (Mackay and Yeun, 1983; Harbeck, 1962) กล่าวคือ k_G ขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วลมและนำความสัมพันธ์ระหว่าง k_G ที่ได้จากการศึกษานี้ไปทำนาย k_G สำหรับสารประกอบอินทรีย์อื่นโดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบอินทรีย์นั้นต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในอากาศยกกำลัง 0.67 เป็นตัวปรับแก้ ดังสมการ (1.36) และสมการนี้ก็นำไปใช้สำหรับประมาณอัตราการระเหยของโพลีคลอริเนตไบฟีนิล (polychlorinated biphenyl) จากทะเลสาบโดยนักวิจัยหลายๆท่าน

$$k_G = (0.3 + 0.2U_{10}) \left(\frac{D_{l-air}}{D_{w-air}} \right)^{0.67} \quad (1.36)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

$D_{l\text{-air}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบ i ในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)

$D_{w\text{-air}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบน้ำในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)

Munnich, *et al.* (1978)

วัด k_G จากการระเหยน้ำในอุโมงค์ลมแบบกลม (circular wind tunnel) พบว่า k_G ขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วลมซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยอุโมงค์แบบกลมพัฒนาขึ้นมาจากอุโมงค์รูปเหลี่ยมเพื่อป้องกันการชนผนังของคลื่นที่เกิดขึ้นและนอกจากนี้ยังสามารถศึกษาผลของคลื่นที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีลักษณะเช่นเดียวกับในธรรมชาติ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับความเร็วลมได้ดังสมการ

$$k_G = 0.5 + 0.36U_{0.075} \quad (1.37)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

Walff and van der Heijde (1982)

ได้ใช้ข้อมูลจากการศึกษาของ Liss (1974) เพื่อหาความสัมพันธ์สำหรับ k_G โดยให้อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีฟิล์มนิ่ง (stagnant film) และได้คำนวณความหนาของชั้นฟิล์มนิ่งจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลและ k_G ของน้ำ ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มขึ้นอยู่กับ friction velocity (U^*) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหา k_G ของสารประกอบอินทรีย์อื่นได้โดยการหารค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารนั้นด้วยความหนาของชั้นฟิล์มแก๊ส ซึ่ง k_G มีความสัมพันธ์กับ friction velocity แบบเส้นตรง และสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้คือ

$$k_G = (8.33 + 18 \times 10^{-3} U^{*0.93}) D_G \quad (1.38)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (cm s^{-1})

U^* = friction velocity (m s^{-1})

D_G = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)

การประมาณ k_G จากสมการนี้มีความยากมากเนื่องจากค่า friction velocity ไม่สามารถวัดได้โดยตรง

Bunyakan (1998)

ศึกษา k_G จากการระเหยของน้ำในอุโมงค์ลมขนาด $2.4 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ โดยให้กระแสลมพัดผ่านผิวน้ำด้วยความเร็วลมอยู่ในช่วง $0 - 6 \text{ m s}^{-1}$ พบว่า k_G มีความสัมพันธ์กับความเร็วลมแบบเส้นตรง แต่จะไม่ต่อเนื่องเมื่อความเร็วลมอยู่ในช่วง $2 - 3 \text{ m s}^{-1}$ เนื่องจากความเร็วลมเปลี่ยนช่วงการไหลจากช่วงลามินาร์ไปเป็นการไหลในช่วงปั่นป่วน สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า transition regime ซึ่งมีค่าเลข Reynolds อยู่ในช่วง $3.2 \times 10^5 - 5 \times 10^5$ และสามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปประมาณ k_G ของสารประกอบอินทรีย์หรือ VOC อื่นได้โดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของ VOC นั้นต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในอากาศยกกำลัง 0.5 เป็นตัวปรับแก้ดังสมการ (1.39) และ (1.40)

การไหลในช่วงการลามินาร์ (laminar flow, $U < 2.10 \text{ m s}^{-1}$)

$$K_G(\text{VOCs}) = (1.88 \times 10^{-3} U_{\text{average}} + 2.95 \times 10^{-3} \left(\frac{D_{\text{VOCs-air}}}{D_{\text{water-air}}} \right)^{0.5}) \quad (1.39)$$

การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow, $U > 2.10 \text{ m s}^{-1}$)

$$K_G(\text{VOCs}) = (5.40 \times 10^{-3} U_{\text{average}-5.08} - 5.08 \times 10^{-3} \left(\frac{D_{\text{VOCs-air}}}{D_{\text{water-air}}} \right)^{0.5}) \quad (1.40)$$

เมื่อ $k_G(\text{VOCs}) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs (cm s^{-1})

$U_{\text{average}} =$ ความเร็วลมเฉลี่ยเหนือผิวน้ำ (m s^{-1})

$D_{\text{VOCs-air}} =$ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

$D_{\text{water-air}} =$ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบน้ำในอากาศ ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

Yu and Hamrich (1984)

ศึกษาผลของความเร็วลมต่อกระบวนการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนจากน้ำภายใต้สภาวะความเร็วลมไม่คงที่ในพอลิไพลีน (Polyvinyl) ซึ่งวางอยู่ในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ข้อมูลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วลมเป็นแบบเส้นตรง แต่จะไม่ต่อเนื่องโดยจะมีจุดการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ความเร็วลม 3.2 m s^{-1} และ k_L ที่ความเร็วลมสูงกว่าจุดการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการคือ

$$K_L = 3.69 \times 10^{-5} U_{10} \quad (1.41)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

Lunney, *et al.* (1985)

ได้ศึกษาผลของความลึกของแหล่งน้ำและความเร็วลมต่อ k_L โดยการระเหยเอทิล อีเทอร์ (ethyl ether) ในช่วงความเร็วลม $0 - 8.09 \text{ m s}^{-1}$ ที่ความลึกต่างๆกันโดยผลของความลึกต่อ k_L ได้ถูกศึกษาในเทอมของค่า F/D เมื่อ F คือเส้นทแยงมุมของถังระเหย และ D คือความลึกของแหล่งน้ำ พบว่าที่ความเร็วลมต่ำๆ ($U < 5 \text{ m s}^{-1}$) และทุกๆอัตราส่วน F/D นั้น k_L จะคงที่ และที่อัตราส่วน F/D อยู่ในช่วง $14 - 50$ นั้นพบว่า k_L แปรผันโดยตรงกับอัตราส่วน F/D และความเร็วลมยกกำลังสอง แต่ k_L จะไม่ขึ้นอยู่กัอัตราส่วน F/D เมื่ออัตราส่วน F/D มากกว่า 50 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปประมาณ k_L ของ VOC อื่นได้โดยใช้อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ที่สนใจต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเอทิล อีเทอร์แสดงดังสมการ

$$k_L = 2.78 \times 10^{-6} \left(\frac{D_{I\text{-water}}}{D_{\text{ethyl-water}}} \right)^{0.5}$$

สำหรับ $0 \leq U_{10} < 5 \text{ m s}^{-1}$ และทุกๆ อัตราส่วน F/D (1.42)

$$k_L = 2.60 \times 10^{-9} (F/D) + 1.277 \times 10^{-7} U_{10}^2 \left(\frac{D_{I\text{-water}}}{D_{\text{ethyl-water}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

สำหรับ $U_{10} > 5 \text{ m s}^{-1}$ และ $14 \leq F/D \leq 50$ (1.43)

$$k_L = 2.61 \times 10^{-7} U_{10}^2 \left(\frac{D_{I\text{-water}}}{D_{\text{ethyl-water}}} \right)$$

สำหรับ $U_{10} > 5 \text{ m s}^{-1}$ และ $F/D \geq 50$ (1.44)

$$\text{และ } U_{10} = U_{0.1} \left(\frac{10}{0.1} \right)^{\frac{1}{7}}$$

(1.48)

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

$U_{0.1}$ = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 0.1 เมตร (m s^{-1})

F/D = อัตราส่วนของเส้นทแยงมุมของถังระเหยต่อความลึกของแหล่งน้ำ (ไม่มีหน่วย)

$$D_{\text{water}} = \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบ } i \text{ ในน้ำ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$$

$$D_{\text{ethyl-ether}} = \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ของเอทิล อีเทอร์ในน้ำ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$$

Liss and Merlivat (1986)

ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วลมทั้งในอุโมงค์ลมและในภาคสนามซึ่งเป็นแบบเส้นตรง แต่จะไม่ต่อเนื่องที่ความเร็วลมเท่ากับ 3.6 และ 13 m s^{-1} โดยทั่วไปแล้วผิวน้ำมีลักษณะเรียบจนถึงที่ความเร็วลมเท่ากับ $5 \pm 3 \text{ m s}^{-1}$ และในช่วงนี้ k_L เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้น และในช่วงความเร็วลม 3.6 – 13 m s^{-1} จะเกิดคลื่นบนผิวน้ำอย่างสมบูรณ์ซึ่ง k_L เป็นฟังก์ชันกับความเร็วลมอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และที่ความเร็วลมสูงกว่า 13 m s^{-1} จะมีฟองอากาศเกิดขึ้นเพราะความแรงของคลื่นที่เกิด และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วลมได้ดังสมการ (1.46) สมการ (1.47) และสมการ (1.48) ตามขนาดของความเร็วลม และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อหาฟลักซ์การระเหยของ PCB จากทะเลสาบโดย Achman, *et al.* (1993)

$$k_L = 0.17U_{10} \left(\frac{600}{Sc_L} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{สำหรับ } U_{10} \leq 3.6 \text{ m s}^{-1} \quad (1.46)$$

$$k_L = (2.85U_{10} - 9.65) \left(\frac{600}{Sc_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ } 3.6 < U_{10} \leq 3.6 \text{ m s}^{-1} \quad (1.47)$$

$$k_L = (5.9U_{10} - 49.3) \left(\frac{600}{Sc_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ } U_{10} > 3.6 \text{ m s}^{-1} \quad (1.48)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

Sc_L = เลข Schmidt ของของเหลว (ไม่มีหน่วย)

Wanninkhof, *et al.* (1990)

วัด k_L จากการระเหยของซัลเฟอร์เฮกซะฟลูไรด์ (SF_6) ในทะเลสาบ 5 แห่ง ซึ่งมีพื้นที่ผิว 0.31 km^2 – 450 km^2 พบว่า k_L ที่วัดได้จากทะเลสาบแต่ละแห่งมีค่าแตกต่างกันทั้งที่ความเร็วลมเดียวกัน และได้อธิบายความแตกต่างนี้ว่ามีสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวของทะเลสาบมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่ง

มีผลให้อัตราการระเหยไม่เท่ากัน และได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วลมสำหรับ ทะเลสาบที่มีความเร็วลมต่ำกว่า 8 m s^{-1} ได้ดังสมการ

$$k_L = 0.45U_{10}^{1.64} \left(\frac{Sc_L}{600} \right)^{-0.5} \quad (1.49)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

Sc_L = เลข Schmidt ของของเหลว (ไม่มีหน่วย)

จากสมการ (1.49) ดัชนี (index) ความเป็นเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 0.66 กล่าวได้ว่า k_L มีความกระจัดกระจายอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่มีความแน่นอนและไม่อาจจะทำการ extrapolated เพื่อใช้นอกช่วงความเร็วลมที่ศึกษาได้

Wanninkhof and Bliven (1991)

ศึกษาผลของความเร็วลมต่อ k_L ในอุโมงค์ลมขนาดใหญ่ (100 m. x 8 m. x 0.7 m.) โดยการให้น้ำอิมิตัวด้วยแก๊ส SF_6 , N_2O และ CH_4 และวัดความเข้มข้นของแก๊สดังกล่าว พบว่าจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและ k_L แปรผันโดยตรงกับความเร็วลมยกกำลัง 1.73 และสามารถนำความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาไปประมาณ k_L สำหรับ VOC อื่นได้ โดยใช้เลข Schmidt ของ VOC นั้นเป็นตัวปรับแก้ดังสมการ

$$k_L = 0.32U_{10}^{1.73} \left(\frac{Sc_L}{600} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.50)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (cm s^{-1})

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m s^{-1})

Sc_L = เลข Schmidt ของของเหลว (ไม่มีหน่วย)

จากการศึกษาของ Wanninkhof and Bliven (1991) พบว่า k_L ที่วัดได้จากอุโมงค์ลมขนาดใหญ่ นี้อยู่ในช่วงที่วัดได้จากอุโมงค์ขนาดเล็กและจากภาคสนาม

Bunyakhan (1998)

ศึกษาผลของความเร็วลมต่อ k_L สำหรับสารละลายทุโลอินจากน้ำได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$k_L(\text{toluene}) = 4.1 \times 10^{-6} \quad \text{สำหรับ } U \leq 2.1 \text{ m s}^{-1} \quad (1.51)$$

$$k_L(\text{toluene}) = 1.05 \times 10^{-5} U - 2.55 \times 10^{-5} \quad \text{สำหรับ } U \geq 3.1 \text{ m s}^{-1} \quad (1.52)$$

สมการ (1.51) และ (1.52) ได้ปรับเป็นสมการทั่วไปเพื่อให้สามารถใช้กับ VOC อื่นๆโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ดังสมการ (1.53) และ สมการ (1.54)

$$k_L(\text{VOCs}) = 4.1 \times 10^{-6} \left(\frac{D_{\text{VOCs-water}}}{D_{\text{toluene-water}}} \right)^{0.5} \quad \text{สำหรับ } U \leq 2.1 \text{ m s}^{-1} \quad (1.53)$$

$$k_L(\text{VOCs}) = (1.05 \times 10^{-5} U - 2.55 \times 10^{-5}) \left(\frac{D_{\text{VOCs-water}}}{D_{\text{toluene-water}}} \right)^{0.5} \quad \text{สำหรับ } U \geq 3.1 \text{ m s}^{-1} \quad (1.54)$$

เมื่อ $k_L(\text{VOCs})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs (m s^{-1})

$k_G(\text{VOCs})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs (m s^{-1})

$k_L(\text{VOCs,ref})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs อ้างอิง (m s^{-1})

$k_G(\text{VOCs,ref})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs อ้างอิง (m s^{-1})

$D_{\text{VOCs-gas}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ในวัฏภาคแก๊ส ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

$D_{\text{VOCs,ref-gas}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs อ้างอิงในวัฏภาคแก๊ส ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

Thibodeaux (1978)

ได้ศึกษา k_L และ k_G ในบ่อเติมออกซิเจนที่จำลองขึ้นและได้นำเสนอสมการเอ็มพีริคัลที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับกำลังที่ให้แก่ชุดกวน (aerators) ดังนี้

$$k_{L,aerated} = \frac{JP_o(1.024)^{T-20} \alpha(10^6)}{a_v V(165)} \left(\frac{D_{I-water}}{D_{O_2-water}} \right)^{0.5} \quad (1.55)$$

เมื่อ $k_{L,aerated}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสำหรับ aerated surface (ft hr⁻¹)

J = อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนของ aerator

= 3 lb O₂ /hr-hp

P₀ = กำลังที่ให้แก่ aerator (hp)

α = ตัวปรับแก้สำหรับการถ่ายโอนออกซิเจน

a_v = พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร (ft⁻¹)

V = ปริมาตร (ft³)

T = อุณหภูมิ (K)

สำหรับ k_G นั้น Thibodeaux (1978) พบว่าจะขึ้นอยู่กับขนาดหยดของของเหลวที่เกิดขึ้นและสมการเอ็มพิริคัลที่เขาได้นำเสนอสำหรับคำนวณ k_G ใน Convection zone คือ

$$k_{G,aerated} = \frac{C_i D_{i-water}}{d_p} \left(2 + .0347 (\text{Re}' Sc_G^{0.5})^{0.62} \right) \quad (1.56)$$

$$\text{Re}' = \frac{d_p V \rho_{air}}{\mu_{air}} \quad (1.57)$$

เมื่อ $k_{G,aerated}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับ aerated surface (ft hr⁻¹)

Re' = Reynolds number (ไม่มีหน่วย)

C_i = ความเข้มข้นของสารประกอบ i (mol ft⁻³)

D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหยดของของเหลว (ft)

Reinhart (1997)

ได้ศึกษา k_G โดยใช้ถังกวนที่มีใบกวนแบบเรียบ (flat-bladed surface agitator) ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{G,aerated}$ กับตัวแปรอื่นๆที่สำคัญๆ เช่นขนาดของใบกวน และความเร็วรอบของกวนดังนี้

$$k_{G,aerated} = 0.00039 \frac{\rho_g D_{i-air}}{d} (\text{Re}'')^{1.42} (N_p)^{0.4} (Sc_G)^{0.5} (Fr)^{-0.21} \quad (1.58)$$

$$\text{Re}'' = \frac{d^2 \omega \rho_{air}}{g \mu_{air}} \quad (1.59)$$

$$N_p = \frac{P_r g}{\rho_L d^2 \omega^3} \quad (1.60)$$

$$Fr = \frac{d\omega^2}{g_c} \quad (1.61)$$

เมื่อ $k_{G,aerated}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับ aerated surface (ft hr^{-1})

Re' = Reynolds number (ไม่มีหน่วย)

d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ aerator (ft)

N_p = Power number (ไม่มีหน่วย)

g = ค่าคงที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m s^{-2})

Fr = Froude number (ไม่มีหน่วย)

D_{i-air} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบ i ในอากาศ ($\text{ft}^2 \text{hr}^{-1}$)

ω = ความเร็วรอบของ aerator (rpm)

Dewulf, *et al.* (1998)

วัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOC 13 ชนิด ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคแก๊สและแหล่งน้ำเพื่อศึกษาผลการกวนในแหล่งน้ำในถังปฏิกรณ์ต่อ k_L โดยถังปฏิกรณ์มีขนาดความสูง 30 ซม. และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 ซม. ในการทดลองจะควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ (25 ± 1 °C) และกวนให้ของเหลวไหลด้วยความเร็วรอบอยู่ในช่วง Transition regime และช่วงความปั่นป่วน (turbulent regime) พบว่า k_L ขึ้นอยู่กับกับระดับความปั่นป่วนของเหลวซึ่งแสดงอยู่ในรูปเลข Reynolds ดังสมการ (1.62) ซึ่งสามารถนำสมการนี้ไปประมาณการเปลี่ยนแปลงของ VOC ในธรรมชาติได้โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC และออกซิเจน (D_{VOC}/D_{O_2})ⁿ เป็นตัวปรับแก้

$$\ln k_{VOC} = 8.15 \times 10^{-5} Re + 0.736 \quad (1.62)$$

เมื่อ k_{VOC} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOC (cm s^{-1})

Re = Reynolds number (ไม่มีหน่วย)

Rathbun and Tai (1983)

ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อ k_G จากการระเหยของ สารอินทรีย์จำพวกคีโตน 7 ชนิด ได้แก่ อะซีโตน, 2-บิวทานอน, 3-เพนทานอน, 4-เมทิล-เพนทานอน, 2-เฮกทานอน และ 2-ออกทานอน โดยทำการระเหย VOC ดังกล่าวในภาชนะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 ซม. และสูง 1.5 ซม. ที่อุณหภูมิ 293.2 - 313.2 K พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับอุณหภูมิเป็นไปตามสมการ

$$k_G = a_A \exp(b_A T) \quad (1.63)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (m s^{-1})

T = อุณหภูมิของสารละลาย (K)

a_A, b_A = ค่าคงที่

สำหรับค่าคงที่ a_A และ b_A ของแต่ละสารสามารถหาได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง k_G กับ อุณหภูมิในสเกล log-log โดยค่า a_A และ b_A คือค่าจุดตัดแกน (intercept) และความชัน (slope) ของกราฟดังกล่าวค่าที่ a_A และ b_A ที่ได้จากการระเหยสารอินทรีย์บริสุทธิ์แสดงดังตาราง

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของสารอินทรีย์ 7 ชนิด ที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง k_G กับอุณหภูมิใน สเกล log-log

สารอินทรีย์	a_A (m day^{-1})	b_A (K^{-1})
อะซีโตน	3.33	0.0147
2-บิวทานอล	24.3	0.00991
2-เพนทานอน	22.9	0.00978
3-เพนทานอน	15.0	0.0112
4-เมทิล-2-เพนทานอน	21.4	0.0101
2-เฮกทานอน	17.8	0.0107
2-ออกทานอน	12.8	0.0121

เนื่องจากการศึกษาของ Ruthbun and Tai (1983) กระทำในภาชนะขนาดเล็ก k_G ที่ได้จึง ไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำเปิดขนาดใหญ่

จรัญ บุญกาญจน์ และคณะ (2543)

ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อ k_L และ k_G จากการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำในช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 20 – 40 °C ในถังระเหยขนาด 0.2 x 0.25 x 0.2 m³ ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับ อุณหภูมิสำหรับ VOC ใดๆ ดังสมการ (1.64) และสมการ (1.65) ตามลำดับ

$$k_L(\text{VOCs}) = \left(1.0 \exp\left(\frac{-3805.9}{T}\right) \right) \left(\frac{D_{\text{VOCs-water}}}{D_{\text{toluene-water}}} \right)$$

สำหรับ 293 ≤ T ≤ 313 K (1.64)

$$k_G(\text{VOCs}) = \left(1.32 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{2266.3}{T}\right) \right) \left(\frac{D_{\text{VOCs-air}}}{D_{\text{methanol-air}}} \right)$$

สำหรับ 293 ≤ T ≤ 313 K (1.65)

เมื่อ $k_L(\text{VOCs})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs (cm s⁻¹)

$k_G(\text{VOCs})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs (cm s⁻¹)

T = อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (K)

$D_{\text{VOCs-air}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ในอากาศ (cm² s⁻¹)

$D_{\text{VOCs-water}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ในแหล่งน้ำ (cm² s⁻¹)

$D_{\text{methanol-air}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทานอลในอากาศ (cm² s⁻¹)

$D_{\text{toluene-water}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของทูลูอินในแหล่งน้ำ (cm² s⁻¹)

David, *et al.* (2000)

ได้ศึกษาโมเดลเพื่อใช้สำหรับประมาณการระเหยของ VOC จากท่อระบายน้ำทิ้งของท่อใต้ดิน (underlying channel) ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม โดยการจำลองแบบท่อระบายน้ำทิ้ง และได้เปรียบเทียบค่า $k_L A_c$ ที่วัดได้ระหว่างท่อระบายแบบซีล (seal drain) กับท่อแบบไม่ซีล (open drain) โดยการระเหยของ VOC 5 ชนิด ได้แก่ อะซีโตน เอทิลอะซีโตน โทลูอิน เอทิลเบนซีน โพรพิลเบนซีน พบว่าค่า $k_L A_c$ ของท่อไม่ซีลอยู่ในช่วง 1.9 - 14.4 L min⁻¹ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 L min⁻¹ และท่อซีลมีค่า $k_L A_c$ อยู่ในช่วง 2.9 - 4.9 L min⁻¹ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.1 L min⁻¹ อย่างไรก็ตาม $k_L A_c$ ที่วัดได้อยู่ในช่วงแคบๆ และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า $k_L A_c$ สำหรับการทดลองนี้คือ อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำ และผลจากการทดลองนำไปพัฒนาเป็นสมการทั่วไปเพื่อใช้สำหรับการประมาณการระเหยของ VOC โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มเป็นพื้นฐาน ดังสมการ

$$K_L A_c = [-1350(V_1 - 0.249)^2 + 149.5](S_c)^{0.5}, 0.0 < V_1 < 0.5 \text{ m/s} \quad r^2 = 0.69 \text{ (open drain)} \quad (1.66)$$

$$K_L A_c = 64.4(S_c)^{0.5}, V_1 \leq 0.5 \text{ m/s (open drain)} \quad (1.67)$$

$$K_L A_c = 205V_1^{0.435} S_c^{0.5}, r^2 = 0.81, \text{ seal drain} \quad (1.68)$$

เมื่อ $K_L A_c$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในท่อ ($L \text{ min}^{-1}$)

V_1 = ปริมาตรของของเหลวรวมในระบบ (L)

S_c = เลข Schmit, $S_c = V_{H_2O} / D_I$

วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาผลของความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G)
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G)
3. พัฒนาสมการเชิงพีริคัล (empirical) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G) กับความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำ
4. ใช้สมการที่พัฒนาขึ้นมาในการทำนายพลั๊กซ์ของ VOC เทียบกับผลการทดลอง ภายใต้สภาวะต่างๆ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สมการเชิงพีริคัลของ k_L และ k_G ที่สามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำเปิด
2. เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำในระดับนำร่อง (pilot plant) และในภาคสนาม (field)
3. เพื่อสร้างความเข้าใจ และได้ตระหนักถึงผลกระทบของการระเหย VOC จากแหล่งน้ำต่อมลภาวะทางอากาศให้กับโรงงานอุตสาหกรรมและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

1. สารเคมี

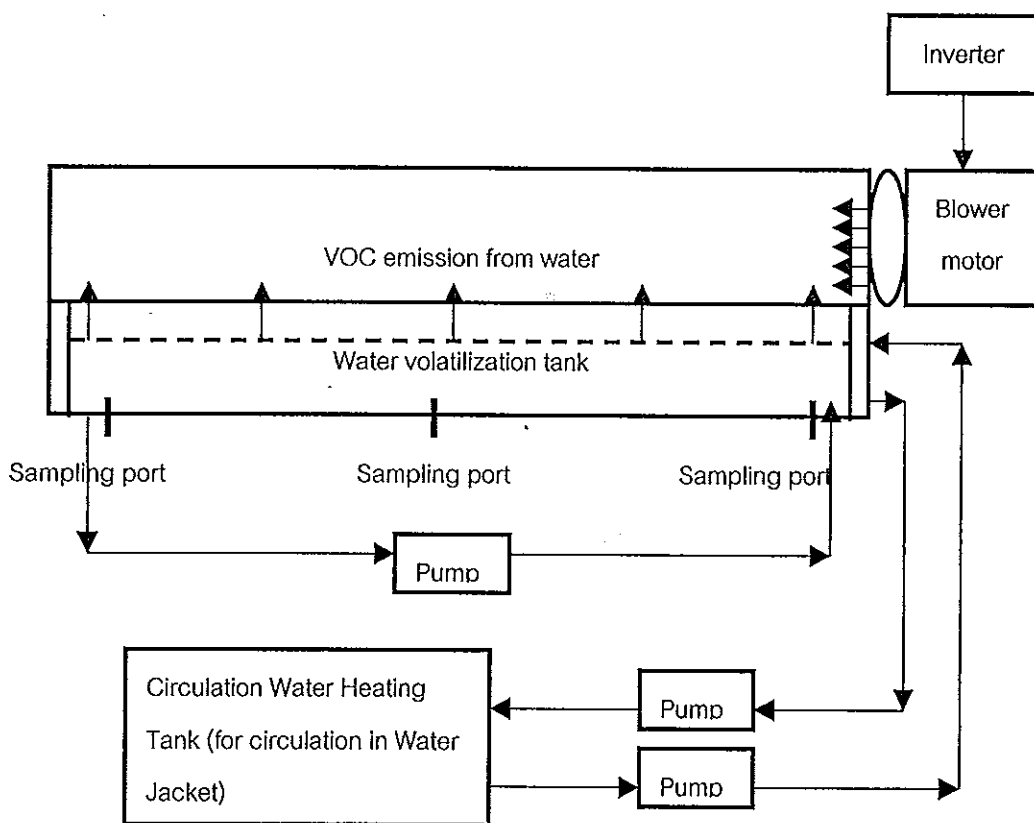
- 1.1 อะซีโตน
- 1.2 เมทานอล
- 1.3 คลอโรฟอร์ม
- 1.4 ทูลูอิน
- 1.5 เมทิล เอทิล คีโตน (MEK)
- 1.6 ไอโซโพรพิล อัลกอฮอล์

2. อุปกรณ์

- 2.1 ชุดการทดลองการระเหย VOC จากวัฏภาคของเหลวประกอบด้วย ถังระเหย (volatilization tank) รูปสี่เหลี่ยมขนาด 3.9 m x 0.4 m x 0.5 m ติดตั้งอยู่ภายใต้อุโมงค์ลม (wind tunnel) ขนาด 4.0 m x 0.5 m x 0.5 m และแหล่งกำเนิดลม
- 2.2 แก๊สโครมาโทกราฟ (Hewlett Packard, model 5790 A) ประกอบด้วยเครื่องตรวจหา (detector) เป็นชนิด FID และแพ็คคอลัมน์ 6 ft 10 % Carbowax 20 M
- 2.3 เทอร์โมคัปเปิล เทอร์โมมิเตอร์ (Scanning Thermocouple Thermometer)
- 2.4 นาฬิกาจับเวลา (Casio, model HS-3)
- 2.5 ชุดกวนผสมประกอบด้วย ถังขนาด 100 L. และใบกวนแบบแบน
- 2.6 พาราฟิล์ม (American National)
- 2.7 ชุดหลอดทดสอบสำหรับเก็บตัวอย่างขนาด 10 ml.

3. วิธีการทดลอง

การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) จากแหล่งน้ำ ทำโดยการศึกษาการระเหยของ VOC ในชุดการทดลองการระเหยแสดงดังภาพประกอบ 1 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆคือ ถังระเหย อุโมงค์ลมพร้อมชุดสร้างและควบคุมความเร็วลม และชุดควบคุมอุณหภูมิ ในแต่ละการทดลองมีขั้นตอนต่างๆที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดต่อไปนี้



ภาพประกอบ 1 ลักษณะและองค์ประกอบของถังระเหย

3.1 การเตรียมสารละลาย

1. นำสารประกอบอินทรีย์หรือ VOC ที่ต้องการศึกษามาละลายน้ำให้มีความเข้มข้นตามที่ ต้องการ ซึ่งน้ำที่ใช้ผ่านการกรองด้วย activated carbon 0.3 ไมครอน ปริมาตร 120 L. และคววมผสมจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน

2. บั้มสารละลายเข้าสู่ถังระเหย และเปิดบั้มให้สารละลายในถังระเหยเกิดการไหลเวียน ตลอดทั่วทั้งถัง

3.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง

1. ในระหว่างการทดลองจะเก็บตัวอย่างจากตำแหน่งต่างๆของถังระเหยจำนวน 3 ตำแหน่ง ตามความยาวของถังระเหย โดยเก็บจากจุดกึ่งกลางตามความลึกของสารละลายในถัง ตัวอย่างที่ได้บรรจุในขวดเก็บตัวอย่าง และปิดด้วยพาราฟิล์ม โดยจำนวนครั้งของตัวอย่างที่เก็บจะ ขึ้นอยู่กับเวลา ความเร็วลม อุณหภูมิของแหล่งน้ำ และชนิดของ VOC ทั้งนี้จะเก็บตัวอย่างตอนเริ่มต้น และที่เวลาต่างๆตามที่กำหนดจนกระทั่งสารในวัฏภาคของเหลวระเหยไปประมาณ 60 – 80% ของความเข้มข้นเริ่มต้น

2. นำตัวอย่างที่เก็บที่เวลาต่างๆ ไปเก็บไว้ในตู้เย็น

3. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น

3.3 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตัวอย่าง

การเตรียม Calibration curve ของสารประกอบอินทรีย์ (เมทานอล อะซีโตน MEK คลอโรฟอร์ม และทูลอีน)

1. เจือจางสารประกอบอินทรีย์ด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นที่ต้องการ (1000, 1000, 1000, 500 และ 200 สำหรับเมทานอล อะซีโตน MEK คลอโรฟอร์ม และทูลอีน ตามลำดับ)

2. นำสารละลายเจือจางของสารประกอบอินทรีย์ตามข้อ 1. ปริมาตร 5 ml ผสมกับสารอ้างอิงมาตรฐาน (internal standard) คือสารละลายไอโซโพรพิล อัลกอฮอล์ในน้ำความเข้มข้น 500 mg L^{-1} ปริมาตร 5 ml ในขวดเก็บตัวอย่าง และเขย่าให้เข้ากัน

3. นำสารละลายผสมตามข้อ 2. ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) โดยสภาวะสำหรับการวิเคราะห์คือ เครื่องตรวจหา (detector) ของ GC เป็นชนิด FID ทำงานที่อุณหภูมิ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิของ Oven เท่ากับ $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของ Injection port เท่ากับ $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการไหลของแก๊สพาเท่ากับ 20 ml min^{-1}

4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับอัตราส่วนของพื้นที่พีคของสารที่ต้องการต่อพื้นที่พีคของสารอ้างอิงมาตรฐาน (peak ratio, PR)

การคำนวณความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างที่เก็บที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 5 ml มาผสมกับสารอ้างอิงมาตรฐาน ซึ่งมีความเข้มข้น 500 mg L^{-1} ปริมาตร 5 ml
2. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ที่สภาวะเดียวกันกับการเตรียม calibration curve
3. คำนวณอัตราส่วนของพื้นที่พีคของสารที่ต้องการต่อพื้นที่พีคของสารอ้างอิงมาตรฐาน และนำไปหาความเข้มข้นของสารนั้นโดยการเทียบกับ Calibration curve

3.4 การควบคุมและการวัดความเร็วลมในอุโมงค์ลม

1. เปิดสวิตช์ควบคุมความเร็วลมเพื่อให้เกิดลมพัดในอุโมงค์ลมและปรับความเร็วลมให้ได้ตามที่ต้องการโดยการปรับความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ของพัดลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Noem Engineering, model NSP) ซึ่งศึกษาที่ความถี่ 0 – 60 Hz
2. ทำการวัดความเร็วลมที่ระยะ 10 cm. เหนือผิวน้ำ เป็นจำนวน 15 จุดทั่วพื้นผิวน้ำ
3. หาความเร็วลมเฉลี่ยของแต่ละความถี่ โดยการรวมความเร็วลมที่วัดได้แต่ละจุดแล้วหารด้วยจำนวนจุด ความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$

3.5 การควบคุมและวัดอุณหภูมิของแหล่งน้ำและอุณหภูมิของอากาศ

1. อุณหภูมิของแหล่งน้ำในถังระเหยควบคุมให้ได้ตามที่ต้องการ โดยใช้น้ำร้อนหล่อในถังเจ็ตเกิดของถังพร้อมถังระเหยและชุดควบคุมอุณหภูมิ
2. วัดอุณหภูมิของแหล่งน้ำจำนวน 3 จุด ตามความยาวของถัง โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมคัปเปิล
3. วัดอุณหภูมิอากาศที่ปลายสุดของถังระเหย ซึ่งตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดลมโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์

3.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วมต่อค่า k_L และ k_G

3.6.1 ผลของความเร็วมต่อ k_L

1. เตรียมสารละลายทุโลอิน ให้มีความเข้มข้น 200 mg L^{-1}
2. บั้มสารละลายนี้เข้าสู่ถังระเหย เปิดบั้มสำหรับให้สารละลายเกิดการไหลเวียน ทั้งนี้เพื่อความเข้มข้นของทุโลอินเท่ากันทั่วทั้ง อุณหภูมิของแหล่งควบคุมให้คงที่ที่ $25 \pm 1^\circ \text{C}$ จึงเปิดพัดลมให้มีความเร็วลมเหนือผิวน้ำเท่ากับ 0 m s^{-1}
3. ทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายตามวิธีการที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2
4. นำไปวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของทุโลอินที่เวลาต่างๆตามวิธีการวิเคราะห์ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.3 และนำไปใช้หาค่า k_L ตามสมการ (1.6) และ (1.11)

5. ทำการทดลองซ้ำดังที่อธิบายข้างต้น แต่เปลี่ยนความเร็วลมเป็น 0.46, 1.52, 2.58, 3.37, 4.21 และ 4.80 m s^{-1}

3.6.2 ผลของความเร็วลมต่อ k_G

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาผลของความเร็วลมต่อ k_L แต่ใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1000 mg L^{-1} แทนการใช้ทูลอีน และนำข้อมูลของความเข้มข้นไปใช้หา k_G ตามสมการ (1.6) และ (1.12)

3.7 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของเหลวต่อ k_L และ k_G

3.7.1 ผลของอุณหภูมิของเหลวต่อ k_L

1. เตรียมสารละลายทูลอีน ให้มีความเข้มข้น 200 mg L^{-1}
2. ป้อนสารละลายนี้เข้าสู่ถังระเหยซึ่งทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาผลของความเร็วลมและควบคุมความเร็วลมให้คงตัวเท่ากับ 0 m s^{-1} และปรับอุณหภูมิของเหลวให้คงที่ที่ 25°C โดยการหล่อน้ำร้อนในแจ็กเก็ตของถัง

3. เมื่ออุณหภูมิของเหลวเท่ากันทั่วทั้งถังจึงทำการเก็บตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

4. ทำการทดลองซ้ำดังที่อธิบายข้างต้น แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของเหลวเป็น 30, 35, 40 และ 45°C

3.7.2 ผลของอุณหภูมิของเหลวต่อ k_G

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาผลอุณหภูมิของเหลวของต่อ k_L แต่ใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1000 mg L^{-1} แทนการใช้ทูลอีน และนำข้อมูลของความเข้มข้นไปใช้หา k_G

3.8 พัฒนาสมการเอมพิริคัลของ k_L และ k_G

1. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับความเร็วลมในช่วงที่ศึกษา โดยการทำให้ Linear regression

2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วงที่ศึกษา โดยการเขียนแบบสมการของการปลดปล่อยออกซิเจนจากวิฎภาคของเหลว ซึ่งใช้ k_L และ k_G ที่ 25°C เป็นค่าอ้างอิง

3. พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างผลของทั้งความเร็วลม และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นสมการเอมพิริคัลโดยการรวมความสัมพันธ์ทั้งสองเข้าด้วยกัน

4. ปรับความสัมพันธ์ที่ได้ให้สามารถใช้สำหรับ VOC ทั่วไปโดยใช้ทุโลอินและเมทานอล เป็นสารอ้างอิงสำหรับสมการเอิมพิริคัลของ k_L และ k_G ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนัก โมเลกุลของสารอ้างอิงต่อน้ำหนักของ VOC ที่สนใจศึกษา ยกกำลัง 0.5 เป็นตัวปรับแก้

3.9 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอิมพิริคัลที่พัฒนาขึ้น

โดยการทำนายค่า K_{OL} และ N_{VOC} ที่สนใจศึกษา (อะซีโตน MEK คลอโรฟอร์ม) ด้วย สมการเอิมพิริคัลของ k_L และ k_G ร่วมกับทฤษฎีสองฟิล์ม และเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่วัดได้ โดยตรงจากทดลอง โดยการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 ที่สภาวะต่างๆ 4 กรณีดังนี้

1. ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิของเหลวคงที่ที่ $25 \pm 1^\circ\text{C}$ และความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$
2. ภายใต้สภาวะที่ความเร็วลมคงตัวที่ 0 m s^{-1} และอุณหภูมิของเหลวในช่วง $25 - 45^\circ\text{C}$
3. ภายใต้สภาวะที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของเหลวในช่วง $1.52, 2.58, 4.21 \text{ m s}^{-1}$ และ $25, 31.5, 33.5^\circ\text{C}$ ตามลำดับ
4. ภายใต้สภาวะการผสมของ VOC มากกว่า 1 ชนิด โดยศึกษาที่ความเร็วลมคงตัวที่ 0 m s^{-1} และอุณหภูมิของเหลวคงที่ที่ 25°C

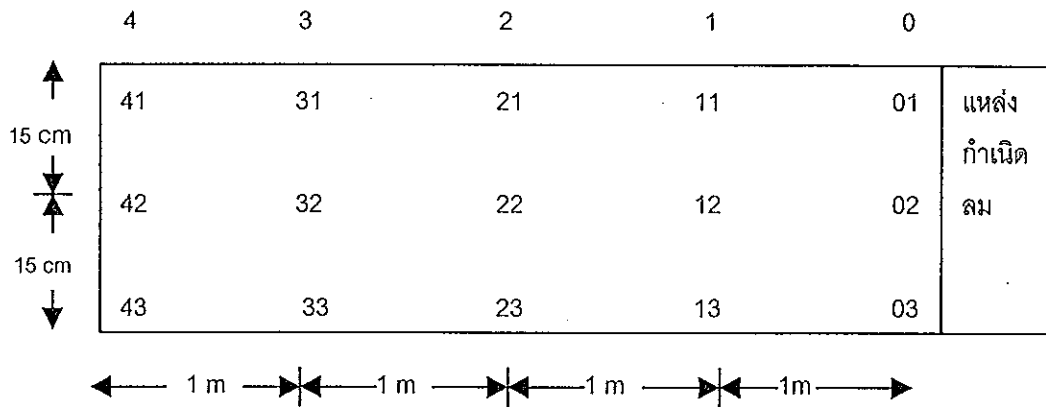
บทที่ 3

ผล และวิจารณ์ผลการทดลอง

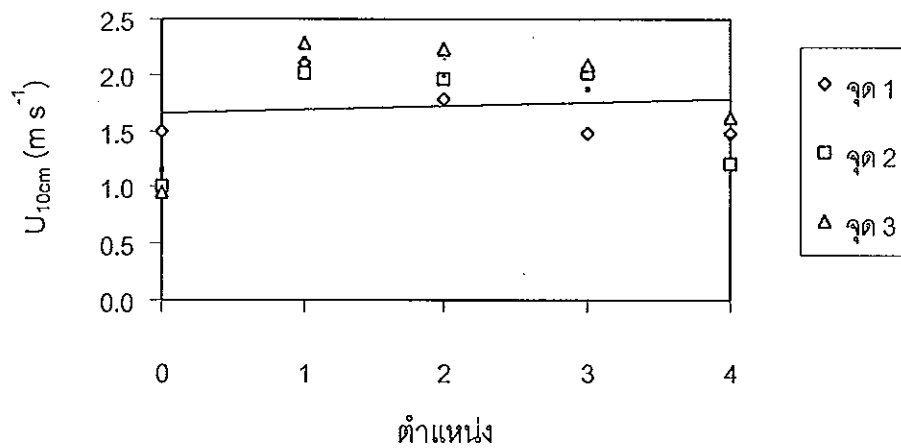
1. ผลของความเร็วลมต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

1.1 การกระจายความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ

ในการศึกษาผลของความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลนั้นได้ทำการวัดความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ โดยใช้อุปกรณ์วัดความเร็วลม วัดความเร็วลมจากปลายที่เป็นต้นกำเนิดลมไปจนถึงปลายอีกด้านหนึ่งของอุโมงค์ลมรวม 5 แถว ซึ่งแต่ละแถวจะห่างกัน 1 เมตร ตามความยาวของถัง และในแต่ละแถวได้ทำการวัดความเร็วลมในแนวขวางของอุโมงค์ลมจำนวน 3 จุด รวมตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลมทั้งหมดเป็น 15 จุดทั่วพื้นผิวน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ลักษณะทั่วไปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่วัดได้ในแต่ละจุดกับความยาวของอุโมงค์ลมแสดงดังภาพประกอบ 3 ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วลมที่วัดได้ในแต่ละแถวมีค่าแตกต่างกันพอสมควร โดยที่ความเร็วลมในแต่ละจุดที่ทำการวัดในแถวที่ 1, 2 และ 3 มีค่าสูงกว่าในแถวที่ 0 และ 4 เนื่องจากที่ในบริเวณแถวที่ 1 นั้นความเร็วลมยังไม่เกิดการกระจายตัวได้อย่างเต็มที่ และการที่ความเร็วลมในแถวที่ 4 นั้นมีค่าน้อยกว่าในแถวอื่นๆ นั้นเพราะว่ากระแสลมจะชนกับผนังของถังระเหยมีผลให้กระแสลมมีทิศทางเคลื่อนที่เปลี่ยนไป และเมื่อพิจารณาในแต่ละแถว จะเห็นว่าความเร็วลมแต่ละจุดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในการทดลองศึกษาได้ใช้ความเร็วลมเฉลี่ยจาก 15 จุดเป็นตัวแทนของความเร็วลมทั่วทั้งผิวน้ำ ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยที่ใช้ในการศึกษาในช่วง $0 - 4.8 \text{ m s}^{-1}$ โดยข้อมูลของความเร็วลมที่ความเร็วลมอื่นๆแสดงในภาคผนวก ข (หน้า 129)



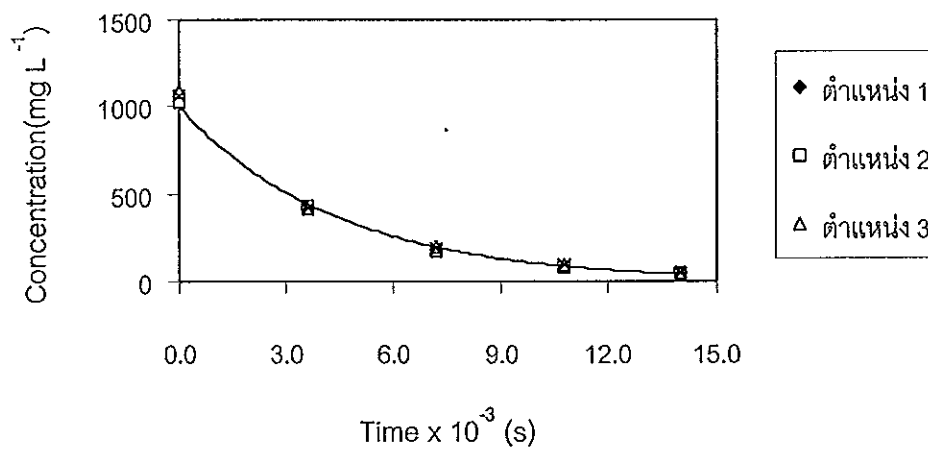
ภาพประกอบ 2 ลักษณะตำแหน่งที่วัดความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ



ภาพประกอบ 3 ความเร็วลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ โดยมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 1.52 m s^{-1}

1.2 ผลของตำแหน่งต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOC

จากการวัดความเข้มข้นของ VOC จากแหล่งน้ำสำหรับกระบวนการระเหยแบบไม่คงตัว ที่ตำแหน่ง 1, 2 และ 3 ตามความยาวของถัง พบว่าความเข้มข้นของ VOC จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และลักษณะทั่วไปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลา ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด สำหรับการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลม 4.21 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงดังประกอบ 4 เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นว่าความเข้มข้นของอะซีโตนที่วัด ณ เวลาใดๆ จากตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวของถังนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในการศึกษานี้จึงใช้ค่าเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นตัวแทนของความเข้มข้นที่เวลานั้นๆ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตำแหน่งที่เวลาต่างๆ แสดงด้วยเส้นทึบในภาพประกอบ ส่วนข้อมูลความเข้มข้นของการทดลองอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ข

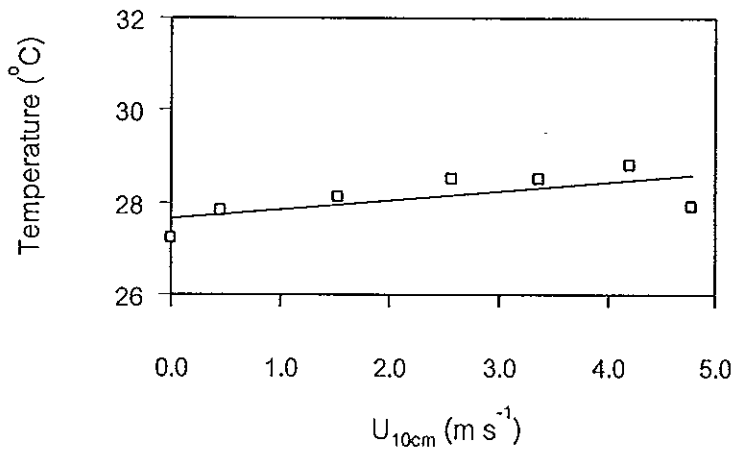


ภาพประกอบ 4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของอะซีโตนที่ความเร็วลม 4.21 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

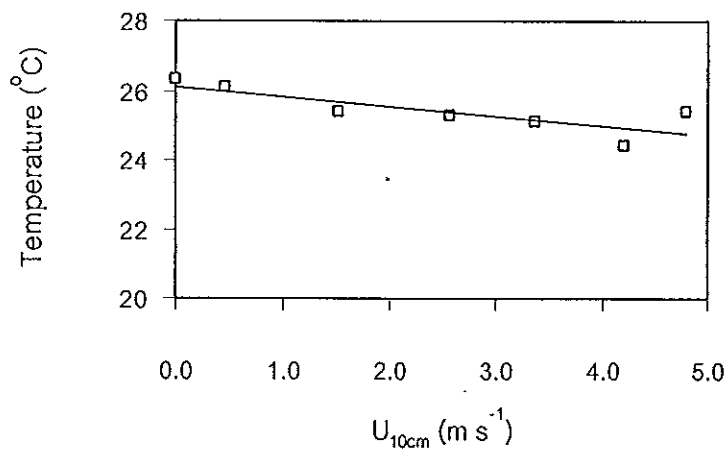
1.3 อุณหภูมิของอากาศและอุณหภูมิของแหล่งน้ำ

จากการทำการวัดอุณหภูมิของอากาศในอุโมงค์ลมที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ ณ ตำแหน่งปลายสุดของถังระเหย โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ (ความผิดพลาด ± 0.1 °C) พบว่าอุณหภูมิของอากาศเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะลดลงจากตอนเริ่มต้นการทดลองมากที่สุดประมาณ 2 °C ที่ความเร็วลมเท่ากับ 4.80 m s^{-1} และความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวจะมีน้อยกว่า 2 °C สำหรับ $U_{10\text{cm}} < 4.80 \text{ m s}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในการศึกษาจึงประมาณได้ว่าอุณหภูมิของอากาศของแต่ละการทดลองมีค่าคงที่ โดยอุณหภูมิของอากาศที่ความเร็วลมต่างๆมีค่าคงที่ที่ 28 ± 1 °C ดังแสดงในภาพประกอบ 5ก

ในแต่ละการทดลองจะทำการบันทึกอุณหภูมิของแหล่งน้ำตลอดความยาวของถังระเหย โดยทำการวัดที่ระยะตรงกลางและปลายทั้งสองของถังระเหยพบว่า ณ ตำแหน่งใดๆความแตกต่างของอุณหภูมิของแหล่งน้ำมีค่าอยู่ในช่วง ± 0.5 °C ซึ่งถือว่าน้อยมากแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแหล่งน้ำมีลักษณะสม่ำเสมอ (uniform) ตลอดทั้งถังระเหย สำหรับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแหล่งน้ำกับเวลา พบว่าอุณหภูมิของแหล่งน้ำจะลดลงสูงสุดประมาณ 1 °C จากอุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองที่ความเร็วลมเท่ากับ 4.80 m s^{-1} สำหรับ $U_{10\text{cm}} < 4.80 \text{ m s}^{-1}$ การลดลงของอุณหภูมิของแหล่งน้ำมีค่าน้อยกว่า 1 °C จึงประมาณได้ว่าอุณหภูมิของแหล่งน้ำมีค่าคงที่โดยตลอดช่วงการศึกษา อุณหภูมิของแหล่งน้ำมีค่าคงที่ที่ 25 ± 1 °C ดังแสดงในภาพประกอบ 5ข



ก.



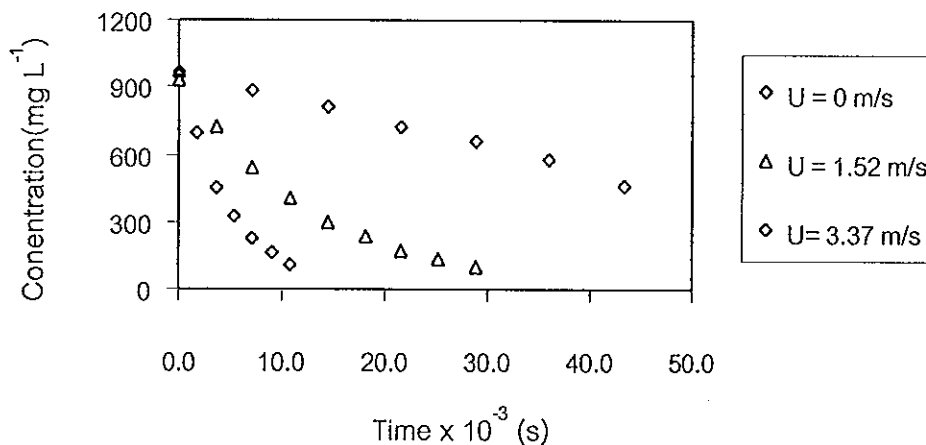
ข.

ภาพประกอบ 5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศ (ก) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำ (ข) ที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 m s^{-1}$

1.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOC กับเวลา

ความเข้มข้นของ VOC ที่วัดได้จากกระบวนการระเหยจากน้ำที่สภาวะไม่คงตัว (unsteady state volatilization) พบว่าความเข้มข้นของ VOC ในน้ำจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมทานอล อะซีโตน คลอโรฟอร์ม ทูโลอิน แสดงในภาคผนวก ข โดยลักษณะการลดลงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของ VOC ในน้ำ เวลาสำหรับการระเหย และที่สำคัญคือขนาดของความเร็วลมที่พัดผ่านผิวน้ำ

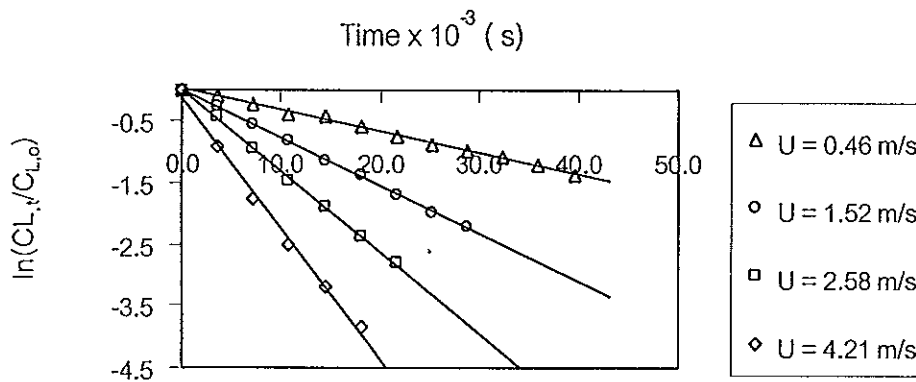
ลักษณะทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOC กับเวลา แสดงดังภาพประกอบ 6 ซึ่งแสดงลักษณะการลดลงของความเข้มข้นของอะซีโตนที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเร็วลมต่างๆ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ความเร็วลม 3.37 m s^{-1} ความเข้มข้นของอะซีโตนจะลดลงเร็วที่สุด ทั้งนี้เพราะความเร็วลมจะไปเพิ่มความปั่นป่วนในบรรยากาศของเหลวและบรรยากาศแก๊สมีผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวและชั้นฟิล์มแก๊สลดลง เมื่อชั้นฟิล์มดังกล่าวถูกทำลายจะทำให้อัตราการระเหยสูงขึ้น ข้อมูลของความเข้มข้นที่เวลาต่างๆจะนำไปใช้สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิฤภาคของเหลว (K_{OL}) และฟลักซ์ของ VOC ใดๆ (N_{VOC})



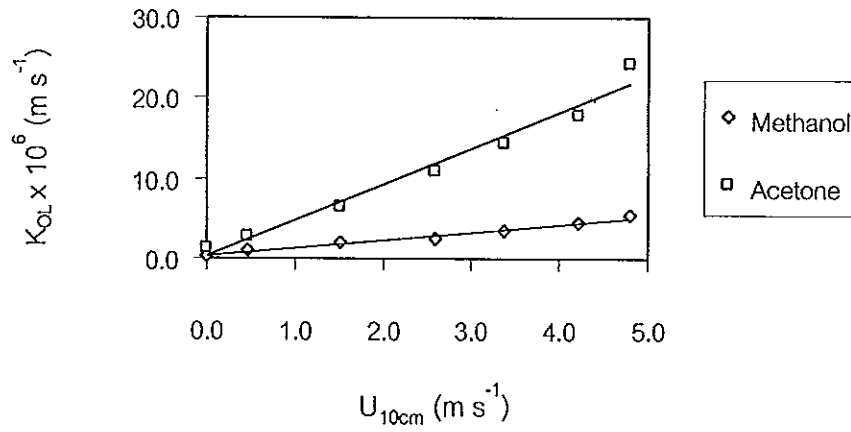
ภาพประกอบ 6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะซีโตนกับเวลาที่ความเร็วลมเท่ากับ 0, 1.52 และ 3.37 m s^{-1}

1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว (K_{OL})

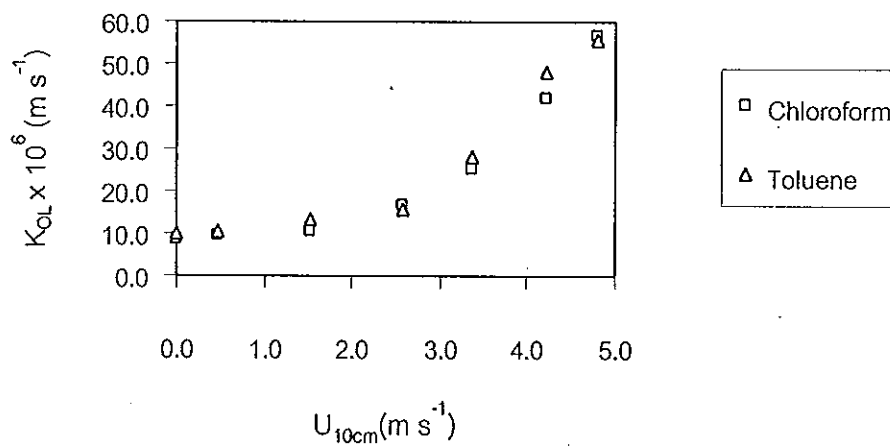
K_{OL} สำหรับกระบวนการระเหย VOC ใดๆจากน้ำ หาค่าได้จากข้อมูลของความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ โดยการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(C_{L,t}/C_{L,0})$ กับ t โดยใช้ non linear regression ตามสมการ (1.6) ลักษณะของกราฟที่พล็อตระหว่างตัวแปรทั้งสองแสดงดังภาพประกอบ 7 ซึ่ง K_{OL} มีค่าเท่ากับความชันของกราฟคูณด้วยความสูงของระดับน้ำในถังระเหย โดย K_{OL} ของ VOC ที่ได้จากการศึกษาในช่วงความเร็วลม $0 - 4.8 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1^\circ\text{C}$ แสดงได้ในภาคผนวก ฉ และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับ K_{OL} แสดงดังภาพประกอบ 8 และ 9 สำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำ (low volatile) และ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง (high volatile) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_{L,t}/C_{L,0})$ กับ Time(s) ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0.46, 1.52, 2.58 และ 4.21 m s^{-1}



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับ U_{10cm} สำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่เฮนรี่ต่ำ



ภาพประกอบ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับ U_{10cm} สำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่เฮนรี่สูง

จากภาพประกอบ 8 จะเห็นได้ว่า K_{OL} ของเมทานอลค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานต่อการระเหยของเมทานอลมากกว่า 90 % อยู่ในวัฏภาคแก๊ส ถึงแม้ว่ามีความเร็วลมเพียงเล็กน้อยก็สามารถปลดความหนาของชั้นฟิล์มแก๊สเหนือผิวน้ำได้ มีผลให้อัตราการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ K_{OL} เพิ่มขึ้นด้วย

จากภาพประกอบ 9 จะเห็นว่า K_{OL} ของ VOC ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำก็คือ ทูโลอิน ถึงแม้ว่า K_{OL} จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น แต่พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับความเร็วลมสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง คือช่วงความเร็วลมต่ำและช่วงความเร็วลมสูง และจะพบจุดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟอยู่ที่ความเร็วลมเท่ากับ 2.58 m s^{-1} การที่พบช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้อาจจะเป็นเพราะว่าการระเหยของทูโลอินมากกว่า 90 % ถูกควบคุมโดยวัฏภาคของเหลว ดังนั้นอัตราการระเหยจึงขึ้นอยู่กับระดับความปั่นป่วนในวัฏภาคของเหลว และการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มนั้นจะต้องมีแรงเฉือนที่สูงพอมากกระทำ ในช่วงความเร็วลมต่ำๆ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.58 m s^{-1}) K_{OL} เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากความเร็วลมในช่วงนี้มีแรงเฉือนที่เกิดบนผิวน้ำไม่สูงพอที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวได้ และในช่วงความเร็วลมสูงๆ (มากกว่า 2.58 m s^{-1}) K_{OL} จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะว่ามีแรงเฉือนที่เกิดบนผิวน้ำจากกระแสลมในช่วงดังกล่าวมีค่าสูงพอที่จะปลดขนาดของชั้นฟิล์ม และทำให้เกิดความปั่นป่วนในวัฏภาคของเหลว ส่งผลให้อัตราการระเหยสูงขึ้น ผลการเปลี่ยนแปลงดังที่กล่าวมาสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ คือในช่วงความเร็วลมต่ำๆผิวน้ำมีลักษณะค่อนข้างเรียบ แต่ที่ความเร็วลม 2.58 m s^{-1} หรือมากกว่านี้จะเริ่มสังเกตเห็นคลื่นเกิดบนผิวน้ำ

สำหรับ VOC ที่มีความต้านทานต่อการระเหยอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} ของ VOC กับความเร็วลมมีลักษณะอยู่ระหว่างลักษณะของทูโลอิน และลักษณะของเมทานอล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการระเหยในแต่ละวัฏภาค อย่างเช่น ในกรณีของคลอโรฟอร์มมีความต้านทานต่อการระเหยอยู่ในวัฏภาคของเหลว 80 % มีผลให้ K_{OL} ของคลอโรฟอร์มมีลักษณะคล้ายกับของทูโลอิน (ภาพประกอบ 9) ในขณะที่อะซีโตนมีเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการระเหยในวัฏภาคของเหลว 20 % ดังนั้น K_{OL} จึงมีลักษณะคล้ายกับของเมทานอล (ภาพประกอบ 8)

1.6 ผลของความเร็วมต่อ k_L

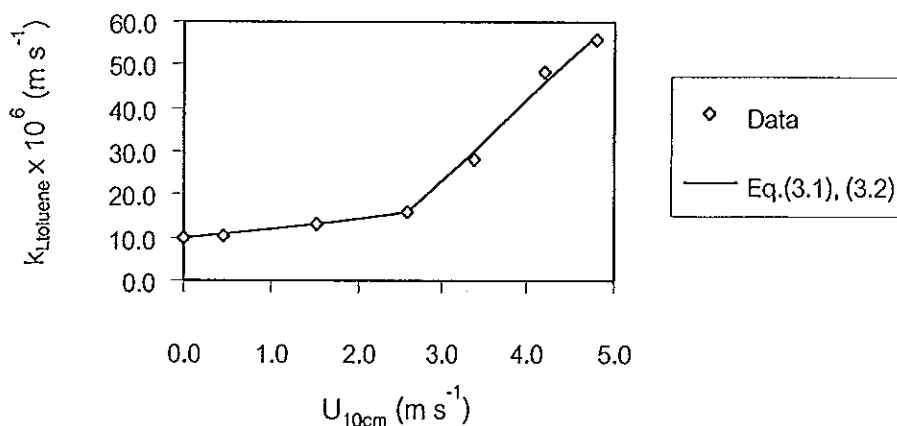
k_L ได้จากกระบวนการระเหยของสารอื่นจากแหล่งน้ำ ดังแสดงในสมการ (1.11) จะเห็นว่า k_L มีค่าเท่ากับ K_{OL} ที่วัดได้จากการทดลอง ทั้งนี้เพราะการระเหยของสารอื่นมีความต้านทานในวัฏภาคของเหลวประมาณ 90 % ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วมได้ดังภาพประกอบ 10 เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบดังกล่าวพบว่า k_L แปรผันกับความเร็วม และมีจุดการเปลี่ยนแปลงความชันอยู่ที่ความเร็วมเท่ากับ 2.58 m s^{-1} โดยที่ความเร็วมต่ำๆ ($U_{10\text{cm}} \leq 2.58 \text{ m s}^{-1}$) k_L จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามขนาดของความเร็วมที่เพิ่มขึ้น และที่ความเร็วมสูงกว่า 2.58 m s^{-1} k_L จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วมมีค่าสูงขึ้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L ของสารอื่นกับความเร็วมด้วยสมการเส้นตรงสองสมการ สำหรับช่วงความเร็วมต่ำหรือเท่ากับ 2.58 m s^{-1} และสำหรับความเร็วมสูงกว่า 2.58 m s^{-1} แสดงดังสมการ (3.1) และสมการ (3.2) ตามลำดับ

$$k_L(\text{toluene}) = 2.33 \times 10^{-6} U_{10\text{cm}} + 9.71 \times 10^{-6}$$

$$\text{สำหรับ } 0 < U_{10\text{cm}} \leq 2.58 \text{ m s}^{-1} \text{ และ } t = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

$$k_L(\text{toluene}) = 1.89 \times 10^{-5} U_{10\text{cm}} - 3.38 \times 10^{-3}$$

$$\text{สำหรับ } 2.58 < U_{10\text{cm}} \leq 4.80 \text{ m s}^{-1} \text{ และ } t = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.2)$$



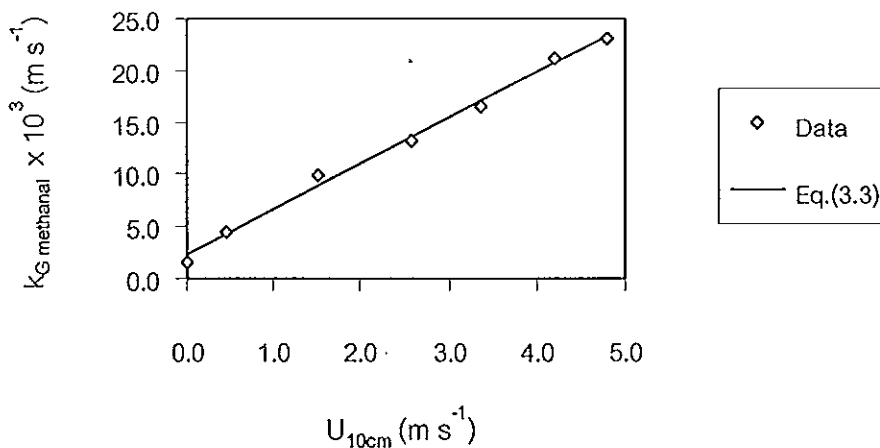
ภาพประกอบ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L(\text{toluene})$ กับ $U_{10\text{cm}}$ ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

1.7 ผลของความเร็วมวลต่อ k_G

เมทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่ง ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ($H < 5 \times 10^{-6} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$) และมีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สประมาณ 90 % ดังนั้นอัตราการระเหยของเมทานอลจึงถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊สและสามารถหา k_G ได้จาก K_{OL} ที่วัดได้จากการทดลองตามสมการ (1.12) ในการศึกษาพบว่าค่า H ที่ใช้ในการหาค่า k_G สามารถหาได้จากรายงานทั่วไป (USEPA, 1982; Snider and Dawson, 1985; Zhou and Mopper, 1990; Wright, *et al.*, 1992a; Staudinger and Roberts, 1996) ความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับความเร็วมวลแสดงดังภาพประกอบ 11 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า k_G แปรผันโดยตรงกับความเร็วมวล และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับความเร็วมวลด้วยสมการเชิงเส้นคือ

$$k_G(\text{methanol}) = 4.37 \times 10^3 U_{10\text{cm}} + 2.25 \times 10^3$$

สำหรับ $0 \leq U_{10\text{cm}} \leq 4.48 \text{ m s}^{-1}$ และ $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (3.3)

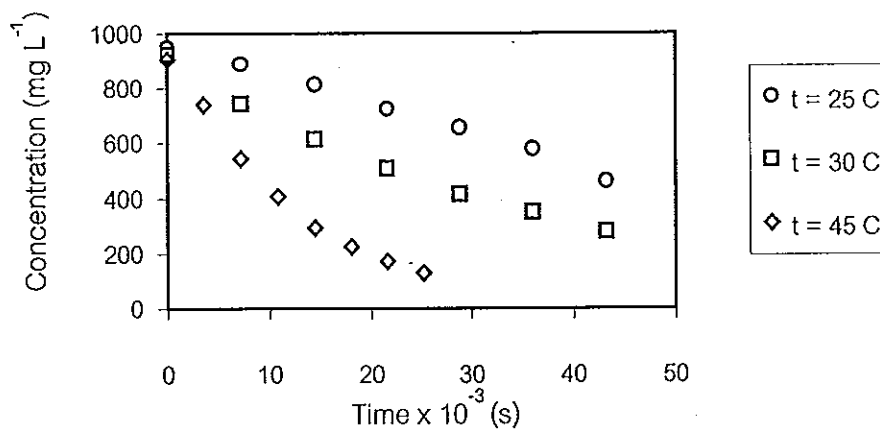


ภาพประกอบ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G(\text{methanol})$ กับ $U_{10\text{cm}}$ ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

2. ผลของอุณหภูมิของแหล่งน้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

2.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา

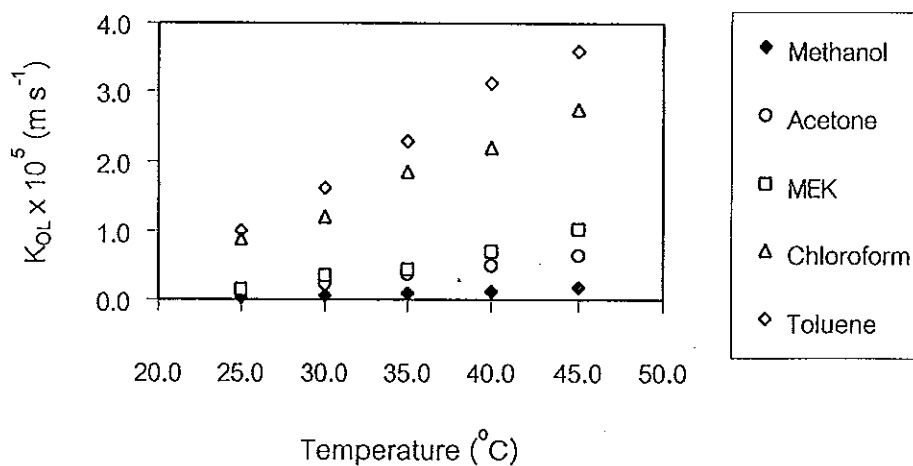
อุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOC กับเวลาที่ได้จากการศึกษาการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในภาพประกอบ 12 ส่วนข้อมูลการระเหยของ VOC อื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ค จากภาพประกอบ 12 พบว่าความเข้มข้นของอะซีโตนจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะมีการถ่ายโอนมวลได้เพิ่มขึ้น เพราะโมเลกุลของสารจะมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและเกิดการชนกัน ทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงพอที่จะเอาชนะแรงต้านที่ผิวสัมผัสได้ และโมเลกุลของสารจึงหลุดออกจากวิภาคของเหลว



ภาพประกอบ 12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา สำหรับกระบวนการระเหยของอะซีโตนที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25, 30 และ 45 °C

2.2 ผลของอุณหภูมิต่อ K_{OL}

K_{OL} ของ VOC ใดๆ คำนวณตามวิธีการในข้อที่ 1 และข้อมูล K_{OL} ที่ได้จากกระบวนการระเหยเมทานอล อะซีโตน MEK โทลูอีน และคลอโรฟอร์มที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวกจ ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ แสดงดังภาพประกอบ 13 โดยจะพบว่า K_{OL} ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำกล่าวคือ K_{OL} ของทุก ๆ VOC เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่มีค่าสูงขึ้นทั้งนี้อัตราการระเหยของสารละลายเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำมีค่าเท่ากันพบว่าโทลูอีนมีค่า K_{OL} มากกว่าของคลอโรฟอร์ม MEK อะซีโตน และเมทานอลตามลำดับเนื่องจากโทลูอีนมีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำกว่าสารดังกล่าว โดยสารใดๆก็ตามที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำๆอัตราการระเหยจะสูง



ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง 25 – 45 °C สำหรับ VOC ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s⁻¹

2.3 ผลของอุณหภูมิต่อ k_L

k_L ของทูลูอีนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่สภาวะไม่คงตัว หาได้จาก K_{oL} ตามสมการ (1.11) เช่นเดียวกับในหัวข้อ 1.6 และความสัมพันธ์ระหว่าง k_L ของทูลูอีนกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 - 45^\circ\text{C}$ และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1} แสดงดังภาพประกอบ 14 เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในการศึกษานี้จะใช้รูปแบบความสัมพันธ์ที่แสดง k_L ที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับ k_L ที่อุณหภูมิ 25°C โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการถ่ายโอนมวลออกซิเจนจากน้ำ (Chern, *et al.*, 1997) จึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำได้ดังสมการ

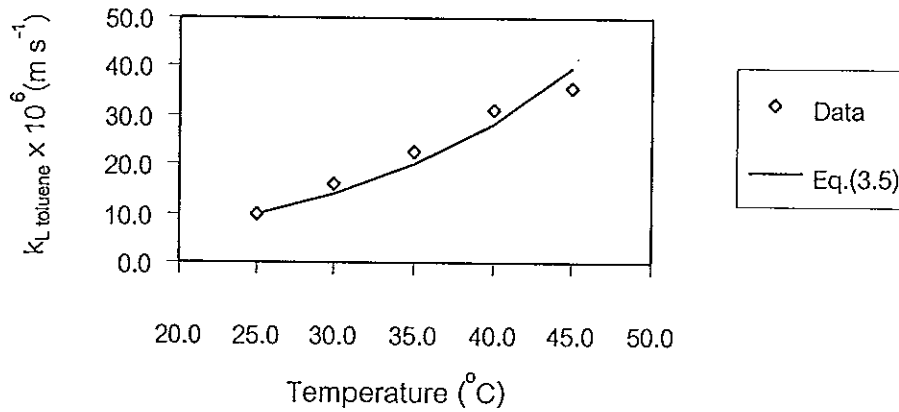
$$k_{L,t}(\text{toluene}) = k_{L,25^\circ\text{C}}(\text{toluene})\theta^{t-25}$$

สำหรับ $25 \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ และ $U_{10\text{cm}} = 0 \text{ m s}^{-1}$ (3.4)

เมื่อ θ คือค่าคงที่ จากวิเคราะห์ข้อมูล $k_L(\text{toluene})$ กับอุณหภูมิ t โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $\theta = 1.072$ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L(\text{toluene})$ กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำคือ

$$k_{L,t}(\text{toluene}) = k_{L,25^\circ\text{C}}(\text{toluene})1.072^{t-25}$$

สำหรับ $25 \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ และ $U_{10\text{cm}} = 0 \text{ m s}^{-1}$ (3.5)



ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L (toluene) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง 25 – 45 °C ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s⁻¹

2.4 ผลของอุณหภูมิต่อ k_G

k_G ของเมทานอลสำหรับกระบวนการระเหยของเมทานอลจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง 25 – 45 °C และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s⁻¹ สามารถคำนวณตามสมการที่ (1.12) และความสัมพันธ์ระหว่าง k_G ของเมทานอลกับอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวแสดงดังภาพประกอบ 15 ซึ่งจะพบว่า k_G ของเมทานอลเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำกล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของแหล่งน้ำมีค่าสูงขึ้นมีผลให้ k_G เพิ่มขึ้นโดยผลที่ได้เหมือนกับทดลองในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ของการระเหยเมทานอลจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิ 25 – 40 °C (จรัญ บุญกาญจน์ และคณะ, 2542) หากความสัมพันธ์ระหว่าง k_G ของเมทานอลที่ 25 °C และที่อุณหภูมิอื่นๆดังที่อธิบายในหัวข้อ 2.3 จะได้ว่า

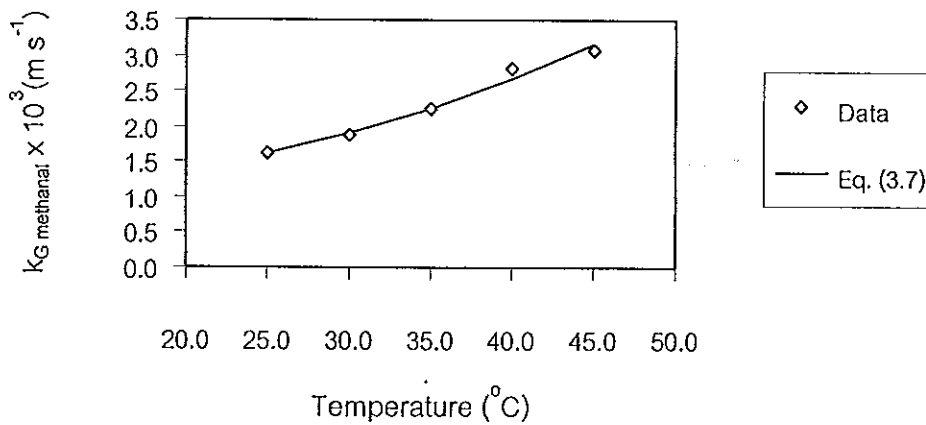
$$k_{G,t}(\text{methanol}) = k_{G,25^\circ\text{C}}(\text{methanol})\theta^{1.25}$$

สำหรับ $25 \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ และ $U_{10\text{cm}} = 0 \text{ m s}^{-1}$ (3.6)

θ ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลระหว่าง $k_{G,t}(\text{methanol})$ กับอุณหภูมิ t โดยใช้ non linear regression พบว่า θ มีค่าเท่ากับ 1.034 ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{G,t}(\text{methanol})$ กับอุณหภูมิ t ดังสมการ

$$k_{G,t}(\text{methanol}) = k_{G,25^\circ\text{C}}(\text{methanol})1.034^{t-25}$$

สำหรับ $25 \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ และ $U_{10\text{cm}} = 0 \text{ m s}^{-1}$ (3.7)



ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G(\text{methanol})$ กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45^\circ\text{C}$ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

3 สมการเอ็มพีริคัลของ k_L และ k_G

ทำการพัฒนาสมการเอ็มพีริคัลของ k_L และ k_G ที่ได้จากการระเหยทุโลอินและเมทานอลจากแหล่งน้ำตามลำดับ ซึ่งจะรวมทั้งผลของความเร็วมวลและผลของอุณหภูมิเข้าด้วยกัน สามารถทำได้โดยการนำเอาสมการมารวมกันคือ สมการ (3.1) รวมกับสมการ (3.5) ได้เป็นสมการ (3.8) สมการ (3.2) รวมกับสมการ (3.5) ได้เป็นสมการ (3.9) และสมการ (3.3) รวมกับสมการ (3.7) ได้เป็นสมการ (3.10)

$$k_L(\text{toluene}) = (2.33 \times 10^{-6} U_{10cm} + 9.71 \times 10^{-6})(1.072)^{t-25}$$

สำหรับ $0 \text{ m s}^{-1} \leq U_{10cm} \leq 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และ $25^\circ\text{C} \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ (3.8)

$$k_L(\text{toluene}) = (1.89 \times 10^{-5} U_{10cm} - 3.38 \times 10^{-6})(1.072)^{t-25}$$

สำหรับ $2.58 \text{ m s}^{-1} < U_{10cm} \leq 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และ $25^\circ\text{C} \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ (3.9)

$$k_G(\text{methanol}) = (4.73 \times 10^{-3} U_{10cm} + 2.25 \times 10^{-3})(1.034)^{t-25}$$

สำหรับ $0 \text{ m s}^{-1} \leq U_{10cm} \leq 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และ $25^\circ\text{C} \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ (3.10)

จากสมการเอ็มพีริคัลของ k_L และ k_G ซึ่งพัฒนาจากการศึกษานี้ ((สมการ 3.8) ,(3.9) และ (3.10) สามารถปรับเป็นสมการทั่วไปเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับ VOC อื่นๆได้ โดยการใส่ k_L และ k_G ของทุโลอินและเมทานอลตามลำดับ เป็นตัวอ้างอิงและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลของสารดังกล่าวต่อน้ำหนักของ VOC ที่สนใจศึกษาเป็นตัวปรับแก้ดังสมการ (3.11), (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ

$$k_L(\text{VOC}) = (2.33 \times 10^{-6} U_{10cm} + 9.71 \times 10^{-6})(1.072)^{t-25} \left(\frac{92.14}{MW_{\text{VOC}}} \right)^{0.5}$$

สำหรับ $0 \text{ m s}^{-1} \leq U_{10cm} \leq 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และ $25^\circ\text{C} \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ (3.11)

$$k_L(\text{VOC}) = (1.89 \times 10^{-5} U_{10cm} - 3.38 \times 10^{-6})(1.072)^{t-25} \left(\frac{92.14}{MW_{\text{VOC}}} \right)^{0.5}$$

สำหรับ $2.58 \text{ m s}^{-1} < U_{10cm} \leq 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และ $25^\circ\text{C} \leq t \leq 45^\circ\text{C}$ (3.12)

$$k_G(\text{VOC}) = (4.73 \times 10^{-3} U_{10\text{cm}} + 2.25 \times 10^{-3}) (1.034)^{t-25} \left(\frac{32.04}{MW_{\text{VOC}}} \right)^{0.5}$$

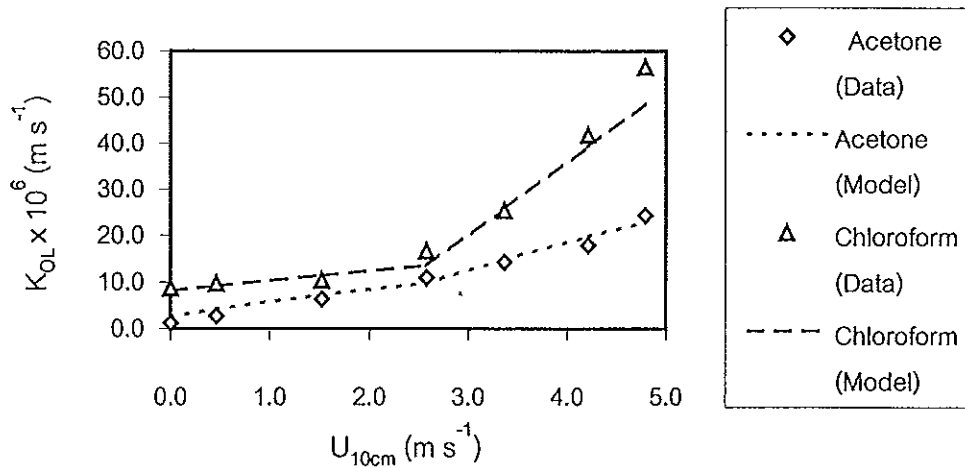
สำหรับ $0 \text{ m s}^{-1} \leq U_{10\text{cm}} \leq 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และ $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (3.13)

ความสัมพันธ์ตามสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) จะช่วยให้สามารถทำนาย k_L และ k_G ของ VOC ใดๆก็ได้ตามที่ต้องการโดยใช้น้ำหนักโมเลกุลเป็นตัวปรับแก้แทนสัมประสิทธิ์การแพร่และ/หรือเลข Schmidt เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลเป็นข้อมูลที่ต้องการและทราบค่า

4. การเปรียบเทียบ K_{OL} ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลกับผลการทดลอง

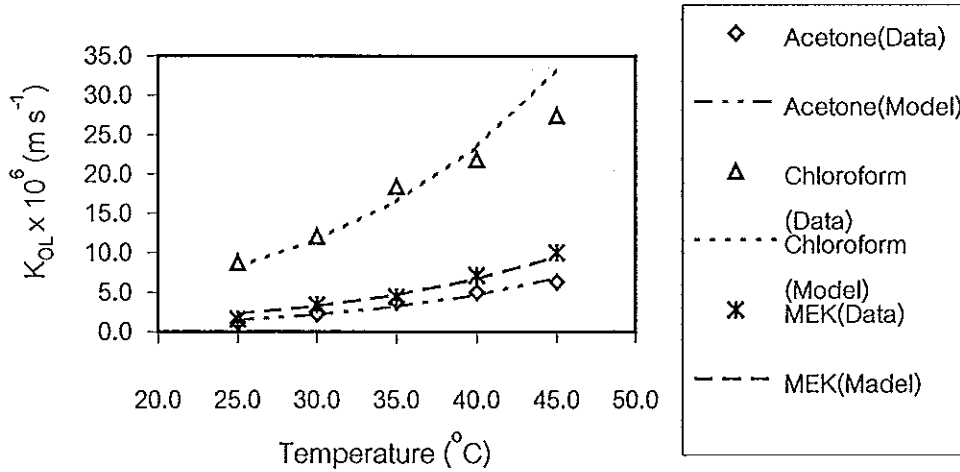
4.1 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเหนือผิวน้ำที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพิริคัลของ k_L และ k_G (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13)) เมื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับสภาวะที่ความเร็วลมเหนือผิวน้ำเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ ทำได้โดยการเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ที่วัดได้โดยตรงจากกระบวนการระเหยของอะซีโตน และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำ กับ K_{OL} ที่คำนวณโดยสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) ผลที่ได้แสดงในภาพประกอบ 16 ซึ่งจะเห็นอย่างชัดเจนได้ว่า K_{OL} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการมีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสมการเอ็มพิริคัลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสภาวะดังกล่าวได้



ภาพประกอบ 16 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมเปลี่ยนแปลงในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2 การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่ความเร็วลมเหนือผิวน้ำคงตัว



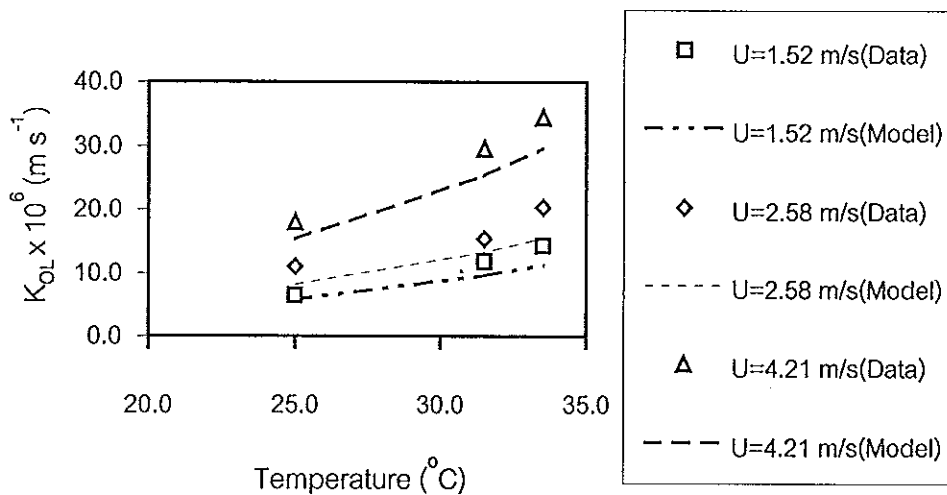
ภาพประกอบ 17 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ

เอ็มพริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน MEK และคลอโรฟอร์ม จากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากภาพประกอบ 17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอ็มพริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13)) กับผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการการระเหยของอะซีโตน MEK และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเร็วลมคงตัวที่ 0 m s^{-1} จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่า K_{OL} ที่ได้จากการทำนายมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง จึงสรุปได้ว่าการนำสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) ไปประยุกต์กับแหล่งน้ำที่มีอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมคงตัวได้

4.3 การแปรเปลี่ยนทั้งความเร็วลมเหนือผิวน้ำและอุณหภูมิของแหล่งน้ำ

โดยทั่วไปในธรรมชาติมีกระแสลมพัดผ่านและในขณะเดียวกันอุณหภูมิของแหล่งน้ำอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่า $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ การสอบความถูกต้องที่จะนำสมการเอ็มพิริคัลที่ได้จากการศึกษา (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13)) ไปประยุกต์ใช้กับสภาวะดังกล่าว ทำโดยการวัด K_{OL} จากกระบวนการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80\text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับ K_{OL} ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี โดยคำนวณ k_L จากสมการ (3.11) และสมการ (3.12) และคำนวณ k_G จากสมการ (3.13) ผลที่ได้แสดงในภาพประกอบ 18 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า K_{OL} ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงกล่าวได้ว่าสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสภาวะดังกล่าวได้



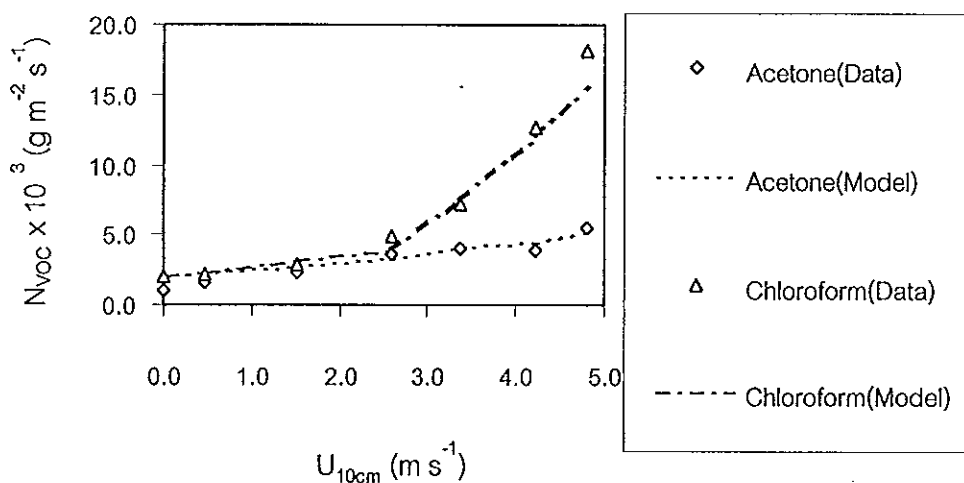
ภาพประกอบ 18 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำ ที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80\text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

5. การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ที่ทำนายจากสมการกับผลการทดลอง

อัตราการระเหยของ VOC ต่อหน่วยพื้นที่หรือฟลักซ์ (N_{voc}) สามารถคำนวณได้สองวิธีคือวัดได้จากการทดลอง ซึ่งหาได้จากความเข้มข้นของ VOC ที่ลดลงในกระบวนการระเหยหารด้วยพื้นที่ของการระเหยดังสมการ (1.10) และอีกวิธีหนึ่งคำนวณได้จากทฤษฎีสองฟิล์มตามสมการ (1.9) ซึ่งจะต้องทราบค่า K_{OL} และ C_L

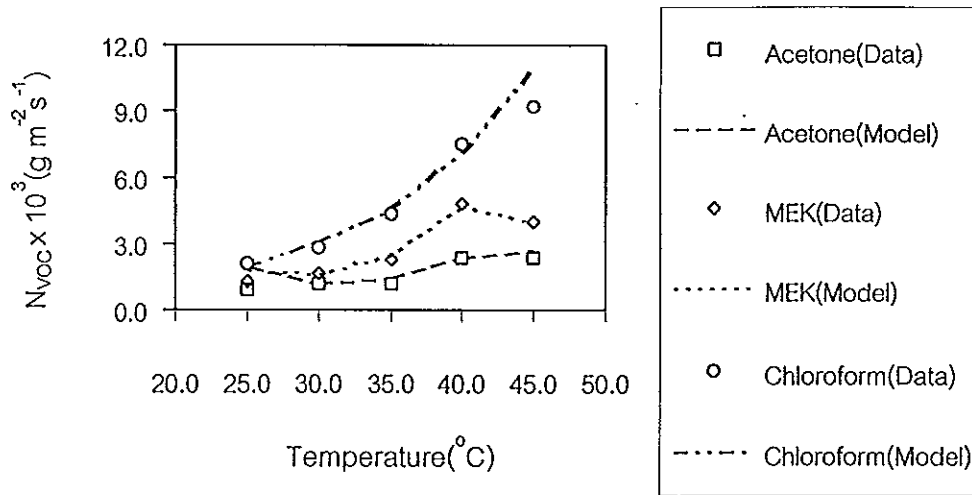
5.1 การแปรเปลี่ยนของความเร็วลมเหนือผิวน้ำ

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13)) เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำภายใต้สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยน ทำได้โดยการวัดฟลักซ์การระเหยของอะซีโตน และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ที่ $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าวร่วมกับทฤษฎีสองฟิล์ม ผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพประกอบ 19 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าฟลักซ์ของ VOC ทั้งสองที่ทำนายโดยสมการมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก



ภาพประกอบ 19 การเปรียบเทียบค่า N_{voc} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยอะซีโตน และคลอโรฟอร์มจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

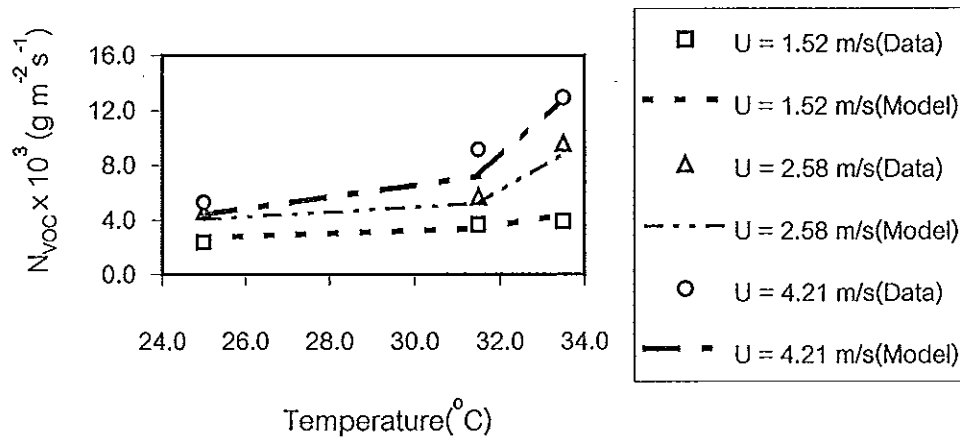
5.2 การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิของแหล่งน้ำ



ภาพประกอบ 20 การเปรียบเทียบค่า N_{voc} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตน MEK และคลอโรฟอร์ม ที่สภาวะ ความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1} และอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากภาพประกอบ 20 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ที่วัดได้จากการทดลองการ ระเหยของอะซีโตน MEK และคลอโรฟอร์ม จากแหล่งน้ำภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปร เปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเร็วลมคงตัวที่ 0 m s^{-1} กับ N_{voc} ที่ทำนายด้วยสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) ร่วมกับทฤษฎีสองฟิล์ม จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่า N_{voc} ที่ได้จากทั้ง สองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงสรุปได้ว่าสมการดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำที่มี อุณหภูมิแปรเปลี่ยน และความเร็วลมเหนือแหล่งน้ำคงตัวได้

5.3 การแปรเปลี่ยนทั้งความเร็วลมเหนือผิวน้ำและอุณหภูมิของแหล่งน้ำ

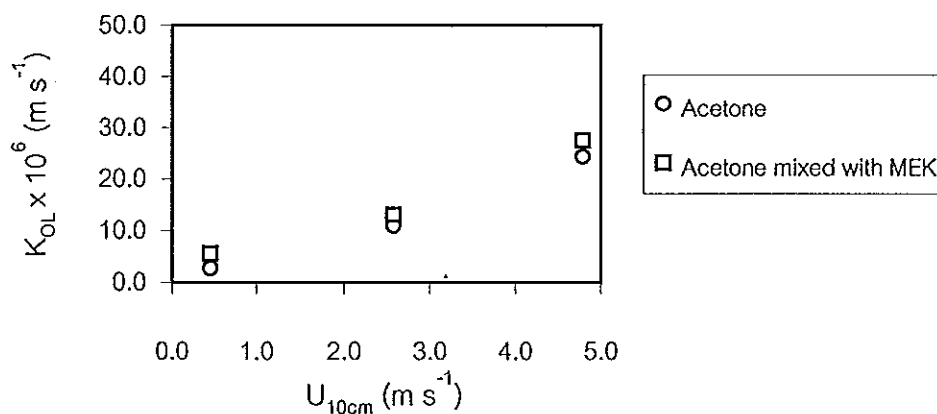


ภาพประกอบ 21 การเปรียบเทียบค่า N_{voc} จากผลการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล สำหรับการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำที่สภาวะความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

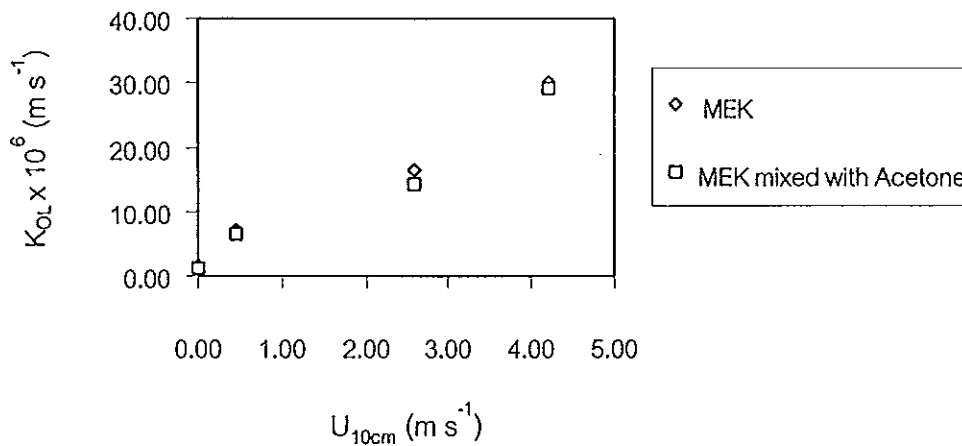
จากภาพประกอบ 21 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ที่วัดได้จากการทดลอง ระเหยอะซีโตนจากแหล่งน้ำภายใต้สภาวะที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และ อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนในช่วง $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ กับ N_{voc} ที่ได้จากการคำนวณจากภาพ ประกอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่า N_{voc} ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าสมการ เอ็มพิริคัลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำที่สภาวะดังกล่าวได้

6. ผลของปฏิกริยาต่อกัน (Interaction) ระหว่าง VOC ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิภูภาคของเหลว (K_{OL}) และฟลักซ์ของ VOC ที่ระเหยจากแหล่งน้ำ

แหล่งน้ำทั่วไปอย่างเช่นระบบบำบัดน้ำเสียจะมี VOC ผสมกันอยู่ เพื่อศึกษาปฏิกริยาต่อกันของ VOC ต่อค่า K_{OL} จะทำการวัดค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการระเหยของอะซีโตนจากสารละลายผสมของอะซีโตนกับ MEK ในแหล่งน้ำ ค่า K_{OL} ที่เปรียบเทียบกับ K_{OL} ที่ได้จากการระเหยของอะซีโตน และ MEK เดี่ยวๆจากแหล่งน้ำดังภาพประกอบ 22 และ 23 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปดังกล่าวว่า K_{OL} ที่ได้จากการระเหยของอะซีโตน และ MEK ในทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถกล่าวได้ว่ากรณีที่มี VOC ผสมกันอยู่ในแหล่งน้ำด้วยความเข้มข้นที่เจือจางจะไม่มีผลต่อการระเหยของ VOC เหล่านั้น



ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่สภาวะเดียวกับค่า K_{OL} ของอะซีโตนที่สภาวะผสมกับ VOC อื่นๆที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 m s^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ที่ $25 \pm 1 ^\circ C$



ภาพประกอบ 23 การเปรียบเทียบค่า K_{OL} ของ MEK ที่สภาวะเดียวกับค่า K_{OL} ของ MEK ที่สภาวะผสมกับ VOC อื่นๆ ที่ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ที่ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากการทดลองนี้แสดงว่า VOC แต่ละชนิดที่ผสมกันอยู่ในแหล่งน้ำอย่างเจือจาง จะมีพฤติกรรมการระเหยเสมือนอยู่เดี่ยวๆ ในแหล่งน้ำนั้น ดังนั้นอัตราการระเหยของ VOC แต่ละชนิดจากแหล่งน้ำที่มี VOC ผสมกันอยู่ก็สามารถหาค่าได้โดยอิสระต่อกันและฟลักซ์ของ VOC จากแหล่งน้ำเปิดใดๆ ที่ระเหยจากแหล่งน้ำเปิดใดๆ ที่มี VOC ผสมกันอยู่สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มดังสมการ (3.14) และ (3.15)

$$N_{VOC,i} = K_{OL,i} C_{L,i} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{K_{OL,i}} = \frac{1}{K_{L,i}} + \frac{RT}{H_i k_{G,i}} \quad (3.15)$$

เมื่อ $N_{VOC,i}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC i จากแหล่งน้ำเปิดที่มี VOC ผสมกันอยู่ ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

$K_{OL,i}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลวของ VOC i (m s^{-1})

$C_{L,i}$ = ความเข้มข้นของ VOC i (mol m^{-3})

$k_{L,i}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC i (m s^{-1})

$k_{G,i}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC i (m s^{-1})

H_i = ค่าคงที่ของเฮนรีของ VOC i ($\text{atm m}^{-3} \text{mol}^{-1}$)

T = อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (K)

จากสมการ (3.15) ถ้าทราบ $k_{L,i}$ และ $k_{G,i}$ ก็สามารถคำนวณหาค่า $K_{O,L,i}$ ได้ เมื่อทราบค่า $K_{O,L,i}$ แล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่า $N_{VOC,i}$ จากสมการ (3.14) ส่วนฟลักซ์รวมของ VOC ทุกชนิดที่ผสมกันอยู่ในแหล่งน้ำใดก็สามารถคำนวณหาได้โดยการรวมฟลักซ์ของแต่ละ VOC เข้าด้วยกันดังสมการ (3.16)

$$N_{VOCs} = \sum_{i=1}^n N_{VOC,i} \quad (3.16)$$

ดังนั้น k_L และ k_G จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาฟลักซ์การระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำ ถึงแม้ว่าสมการของ k_L และ k_G ที่แสดงในสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) จะเป็นสมการเอ็มพิริคัลที่ได้จากการทดลองโดยการระเหยของ VOC เดียวๆ จากแหล่งน้ำ แต่จากผลการทดลองในภาพประกอบ 22 และ 23 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าค่า $K_{O,L,i}$ ที่ได้จากการระเหยของ VOC i เดียวๆ จากแหล่งน้ำมีค่าเท่ากับ $K_{O,L}$ ของ VOC นั้นในสารละลายผสม จึงเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าสามารถใช้สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) ในการหาค่า $N_{VOC,i}$ จากแหล่งน้ำเปิดที่มี VOC ผสมกันอยู่ได้ อย่างไรก็ตามเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) สำหรับสภาวะดังกล่าวจะทดลองใช้ชุดสมการเหล่านี้คำนวณค่าฟลักซ์เฉลี่ยของการระเหยของอะซีโตนและ MEK โดยสมการ (3.14) จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองโดยตรงดังสมการ (3.17)

$$N_{VOC}(Data) = \frac{m_i - m_f}{At_i} \quad (3.17)$$

เมื่อ $N_{VOC}(Data)$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่วัดได้จากการทดลอง ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

m_i = มวลของ VOC ในแหล่งน้ำช่วงเริ่มต้นการทดลอง (mg L^{-1})

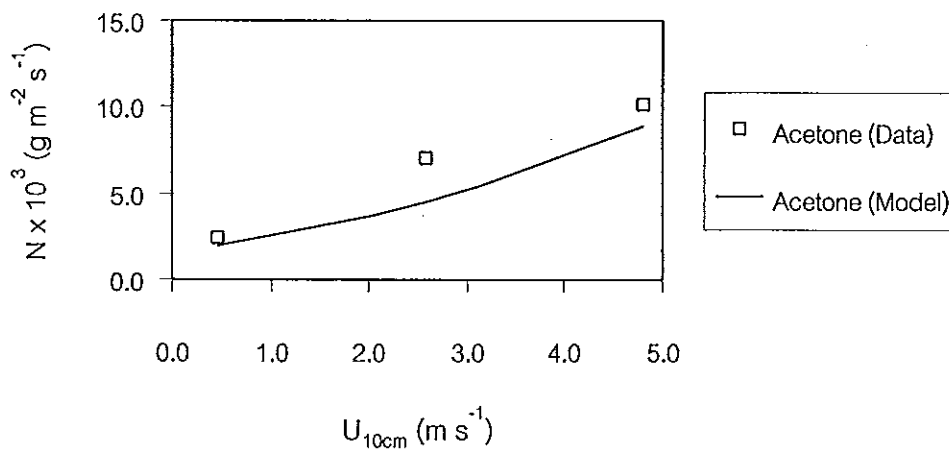
m_f = มวลของ VOC ในแหล่งน้ำช่วงสุดท้ายของการทดลอง (mg L^{-1})

A = พื้นที่สำหรับการระเหย (m^2)

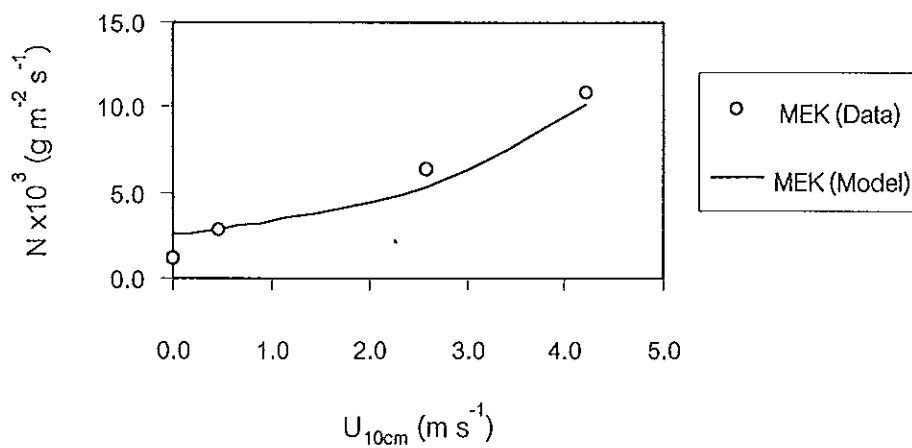
t_i = เวลาสำหรับการระเหย (s)

โดยการเปรียบเทียบ $N_{VOC,i}$ ที่คำนวณตามสมการ (3.14) กับค่าที่วัดได้จากการทดลองตามสมการ (3.17) ก็สามารถตรวจสอบความถูกต้องของการประยุกต์ใช้สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.14) กับแหล่งน้ำที่มี VOC ผสมกันอยู่ได้ ค่าของตัวแปรอื่นๆที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าฟลักซ์ของอะซีโตน และของ MEK คือค่า H ซึ่งสามารถหาได้จากการตรวจเอกสาร (Stuadinger and Roberts, 1996)

ค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลอง ($N_{VOC,Data}$) เปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณ ($N_{VOC,i}$) ในภาพประกอบ 24ก และ 24ข สำหรับอะซีโตนและ MEK ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากภาพประกอบดังกล่าวว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากการทดลองดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาฟลักซ์หรืออัตราการระเหยของ VOC ในแหล่งน้ำเปิดต่างๆที่มี VOC ผสมกันอยู่ได้



ก.



ข.

ภาพประกอบ 24 การเปรียบเทียบค่า N_{VOC} ของอะซีโตน (ก) และของ MEK (ข) ที่สภาวะเดียวกับ
กับค่า N_{VOC} ของอะซีโตน และของ MEK ที่สภาวะที่ผสมกับ VOC อื่นๆ ที่
ความเร็วลมในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ที่ $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

7. การระเหยของ VOC ภายใต้สภาวะของความเร็วมืดไม่คงตัว

การศึกษาผลของความเร็วมืดแบบไม่คงตัวต่อฟลักซ์การระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำนั้น ทำโดยการทดลองการแปรเปลี่ยนความเร็วมืดกับเวลาสำหรับการระเหยเป็นสองรูปแบบคือแบบ I (pattern I) และแบบ II (pattern II) ดังแสดงในภาพประกอบ 25ก และ 25ข ตามลำดับ และจากการตรวจวัดความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำจากทั้งสองกรณีข้างต้นได้ข้อมูลของความเข้มข้นกับเวลาดังแสดงในภาพประกอบ 26ก และ 26ข สำหรับความเร็วมืดแบบ I และแบบ II ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของอะซีโตนกับเวลาจะแตกต่างจากกรณีที่มีความเร็วมืดคงตัวอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน และเนื่องจากความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้นกับเวลาแปรผันโดยตรงกับฟลักซ์การระเหย ดังนั้นจากภาพประกอบ 26ก และ 26ข จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการลดลงของฟลักซ์การระเหยกับเวลาไม่ได้มีรูปแบบที่แน่นอน แต่นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ VOC ในขณะนั้นแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วมืด และช่วงเวลาที่ความเร็วมืดนั้นคงตัวอยู่ด้วย ดังนั้นสำหรับกรณีนี้การคำนวณค่าฟลักซ์เฉลี่ยของฟลักซ์เฉลี่ย ($N_{VOC,average}$) น่าจะเป็นเป็นวิธีการที่น่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งการหา $N_{VOC,average}$ ดังกล่าวก็ยังสามารถทำได้โดยการใช้สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.17) แต่เนื่องจากสมการของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวและสมการของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สที่แสดงโดยสมการ (3.11), (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ นั้นได้จากการทดลองโดยใช้ความเร็วมืดแบบคงตัว จึงต้องมีวิธีการที่จะเอาสมการเหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำที่มีกระแสลมแบบไม่คงตัวพัดผ่าน วิธีการที่เหมาะสมที่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติคือทำการตรวจวัดความเร็วมืดและความเข้มข้นของ VOC จากแหล่งน้ำในช่วงเวลาใดๆ (t_i) ที่กำหนดจากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยของความเร็วมืด (U_i) และค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของ VOC ($C_{L,i}$) ในแต่ละช่วงเวลา t_i นั้นซึ่งเมื่อทราบค่า U_i ในช่วงเวลา t_i ก็สามารถคำนวณหา $k_{L,i}$ และ $k_{G,i}$ ได้ จากนั้นจึงคำนวณค่าเฉลี่ยของ $k_{L,i}$, $k_{G,i}$ และ $C_{L,i}$ ตลอดช่วงเวลาการระเหยได้ โดยใช้ t_i เป็นตัวถ่วง ดังสมการ (3.18) ถึงสมการ (3.20)

$$k_{L,average} = \frac{\sum(k_{L,i}t_i)}{\sum t_i} \quad (3.18)$$

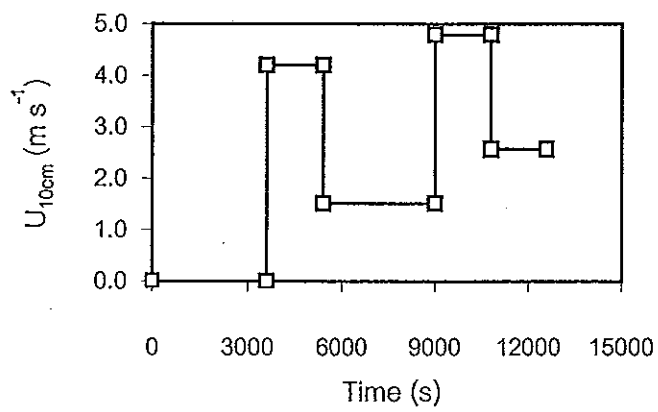
$$k_{G,average} = \frac{\sum(k_{G,i}t_i)}{\sum t_i} \quad (3.19)$$

$$C_{L,average} = \frac{\sum(C_{L,i}t_i)}{\sum t_i} \quad (3.20)$$

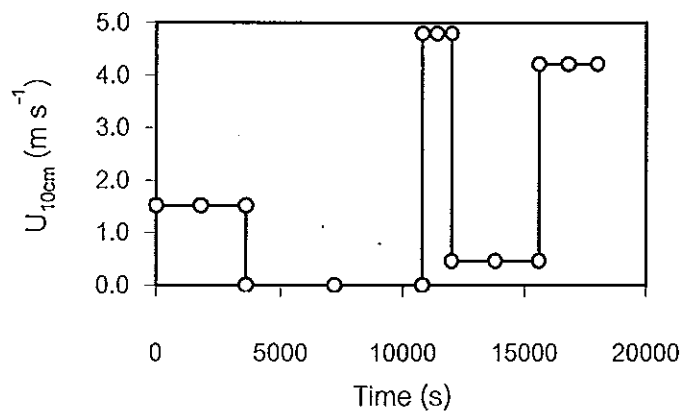
เมื่อทราบค่า $k_{G,average}$, $k_{L,average}$ และ $C_{L,average}$ ก็สามารถหาค่าเฉลี่ยของ $K_{OL,average}$ และ $N_{VOC,average}$ ได้ดังสมการที่ (3.21) และ (3.22) ตามลำดับ

$$\frac{1}{K_{OL,average}} = \frac{1}{k_{L,average}} + \frac{RT}{Hk_{G,average}} \quad (3.21)$$

$$N_{VOC,average} = K_{OL,average} C_{L,average} \quad (3.22)$$

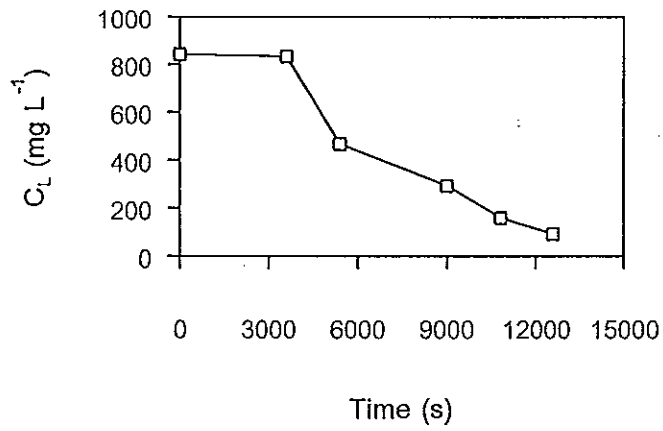


ก.

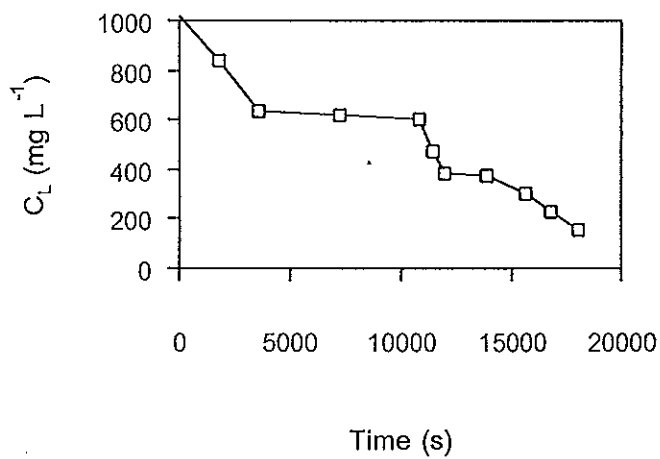


ข.

ภาพประกอบ 25 รูปแบบการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมที่ศึกษาแบบ I (ก) และแบบ II (ข)



ก.



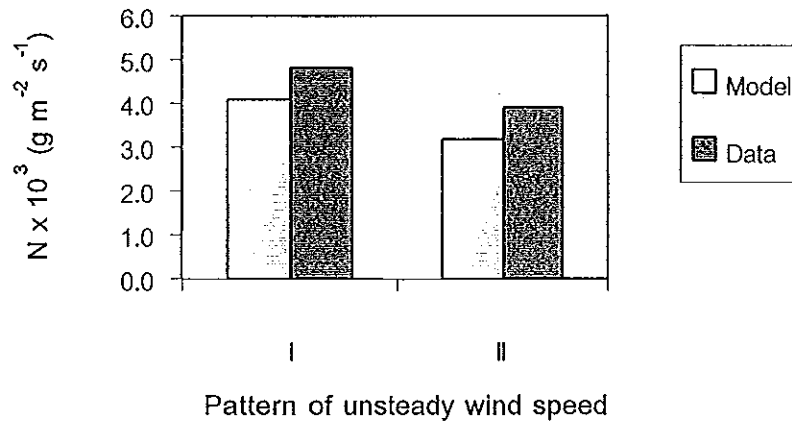
ข.

ภาพประกอบ 26 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกับเวลาสำหรับอะซีไตนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่ความเร็วลมไม่คงตัวในช่วง $0 - 4.80 \text{ m s}^{-1}$ สำหรับรูปแบบของความเร็วลมแบบ I (ก) และแบบ II (ข)

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของชุดสมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) และสมการ (3.18) ถึงสมการ (3.22) จะทดลองใช้ชุดสมการเหล่านี้คำนวณค่าฟลักซ์เฉลี่ยจากการระเหยของอะซีโตนภายใต้ความเร็วลมไม่คงตัวแบบ I (ภาพประกอบ 25ก) และแบบ II (ภาพประกอบ 25ข) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการทดลองโดยตรง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการ (3.17) และจากการเปรียบเทียบดังกล่าวก็สามารถตรวจสอบความถูกต้องของการประยุกต์ใช้สมการ (3.11), (3.12) และ (3.13) กับแหล่งน้ำแบบไม่คงตัวที่พัดผ่านได้

จากข้อมูลของความเร็วลม (U) ก็สามารถคำนวณหาค่า $k_{L,i}$ และ $k_{G,i}$ ที่ t_i ต่างๆได้โดยใช้สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.13) จากนั้นจึงสามารถหาค่า $k_{G,average}$ และ $k_{L,average}$ โดยสมการ (3.18) และสมการ (3.19) จากค่า $k_{G,average}$ และ $k_{L,average}$ ที่คำนวณได้ และค่า H ของอะซีโตนมีรายงานอยู่ทั่วไป (Staudinger and Roberts, 1996) ก็สามารถคำนวณหาค่า $K_{OL,average}$ ได้ตามสมการ (3.21) ในขณะที่เดียวกันจากข้อมูลของ $C_{L,i}$ ก็สามารถคำนวณหา $C_{L,average}$ ได้โดยสมการ (3.20) แล้วก็สามารถหาค่า $N_{VOC,average}$ ได้ตามสมการ (3.22)

ภาพประกอบ 27 แสดงการเปรียบเทียบค่า $N_{VOC,average}$ ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (3.22) กับค่า $N_{VOC(Data)}$ ที่วัดได้จากการทดลองโดยตรงตามสมการ (3.17) ซึ่งจะเห็นได้ภาพประกอบดังกล่าวว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณและค่าฟลักซ์ที่วัดได้จากการทดลองของทั้งความเร็วลมแบบ I และแบบ II มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าสมการของ k_L และ k_G ที่พัฒนาขึ้นจากสภาวะความเร็วลมแบบคงตัวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมจริงที่มีกระแสลมแบบไม่คงตัวตามวิธีการที่นำเสนอข้างต้น



ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{voc} จากการทดลองกับค่า N_{voc} ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับอะซีโตนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่ความแบบไม่คงตัวแบบ I และแบบ II

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทสรุป

1. ผลของความเร็วม

จากการศึกษาการระเหยของทูลอินและเมทานอลจากแหล่งน้ำในช่วงความเร็วม $0 - 4.8 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ที่ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า k_G มีความสัมพันธ์กับความเร็วมแบบเส้นตรงตลอดช่วงความเร็วมที่ศึกษา ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับความเร็วมอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นสองช่วง โดยมีจุดการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ความเร็วมเท่ากับ 2.58 m s^{-1}

2. ผลของอุณหภูมิของน้ำ

จากการศึกษาการระเหยของทูลอินและเมทานอลจากแหล่งน้ำ ในช่วงอุณหภูมิของแหล่งน้ำ $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเร็วมคงตัวที่ 0 m s^{-1} พบว่าทั้ง k_L และ k_G มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น

3. สามารถพัฒนาสมการเอมพิริคัลของ k_L และ k_G กับตัวแปรที่สำคัญคือความเร็วมและอุณหภูมิได้

4. สมการเอมพิริคัลของ k_L และ k_G ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนาย K_{OL} และ N_{VOC} ของ VOC ที่สนใจ ภายใต้สภาวะต่างๆในห้องปฏิบัติการได้

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษานี้

1. จะต้องมีการศึกษาภาคสนามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากสมการเอมพิริคัลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

2. ควรจะมีการศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆที่อาจจะมีผลต่ออัตราการระเหยของ VOC เช่น ในระบบการให้อากาศ pH ของสารละลาย และผลของสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น

บรรณานุกรม

- จรัญ บุญกาญจน์, วิจัย หนูทอง และสถาพร เขียวพงษ์อารี. 2542. "ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารของกระบวนการระเหยของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำ", วารสารสงขลานครินทร์ 22(เมษายน-มิถุนายน), 241-247.
- Benkelberg, H. J. And Warneck, P. 1995. "Henry's Law Constant for Aqueous Solutions of Acetone, Acetaldehyde and Acetonitrile, and Equilibrium Constant for the Addition Compound of Acetone and Acetaldehyde with Bisulfite", Journal of Atmospheric Chemistry. 20(1995), 17-34
- Brida, W. J. And Kee Ong, S. 1998. "Air Sparging: Air-Water Mass Transfer Coefficient", Water Resources Research. 12(1998), 3245-3253
- Bunyakana, C. 1998. "Mass Transfer Coefficient for Surface Impoundment and Reduction of Volatile Organic Compound Emissions", Ph.D. dissertation Vanderbilt University, Nashville TN.
- Chern, J. And Yu, C. 1997. "Oxygen Transfer Modeling of Diffused Aeration System", Industrial Engineering Chemistry Research. 36(1997), 5447-5453
- _____. 1999. "Volatile Organic Compound Emission from Diffused Aeration System: Experimental and Modeling", Industrial Engineering Chemistry Research. 38(1999) 2516-2519.
- Dankwerta, P.V. 1951. Industrial and Engineering Chemistry. 43(1951), 1460

Dewulf, J., Langenhove, H. V. And Heireman, B. 1998. "The Air/Water Exchange of Volatile Organic Compound from Water in The Transient and Turbulent Regime", Water Research. 32(1998),2106-2112.

Herback. 1962. G.E. Geological survey Prof. Paper, 272E, U.S. Govt. Printing Office Washington, D.C.

Higbie, R. 1935. Transaction of the American Institute of Chemical Engineers. 31(1935), 365.

Hinckley, D.A. and Bidleman, T. F. 1991. "Atmospheric Organochlorine Pollutants and Air-Sea Exchange of Hexachlorocyclohexane in the Bering and Chukchi Sea" Journal of Geophysical Research. 96(1991), 7201-7213.

Liao, Y.C. and Lee, D. J. 1997. "Estimation of VOCs and Semivolatiles Emission Rate from an Intermittently Aerated Bioreactor", Industrial Engineering Chemistry Research. 36 (1997), 881-887.

Liss, P. S. 1973. "Process of Gas Exchange Across an Air-Water Interface", Deep-sea Research. 20(1973), 211-238.

_____. 1980. "Gas Exchange Across the Air-Sea Rates : Introduction and Synthesis", In the Role of Air-Sea Exchange in Geo Chemical Cycling edited by Buat-Menard, P. Nato ASI Series C, D. Reidel Publishing Co., Dordrechts, Holland, 185(1986),113-127.

Liss, P.S. and Slater, P. Q. 1974. "Flux of Gases across the Air-Sea Interface", Nature. 247 (1974), 181-184.

- Little, J. C. 1992. "Applying the Two-Resistance Theory to Contaminant Volatilization in Showers", Environmental Science Technology. 26(1992), 1341-1949.
- Mackay, D. and Yeun, T. K. 1983. "Mass Transfer Coefficient Correlation for Volatilization of Organic Solutes from Water", Environmental Science Technology. 17(1983), 211-217.
- Matter-Muller, C., Gujer, W. And Giger, W. 1981. "Transfer of Volatile Substances from Water to the Atmosphere", Water Research. 15(1981), 1271-1279.
- Munnich, K. O., et al. 1978. "Gas Exchange and Evaporation Studied in a Circular wind tunnel, Continuous Radon-222 Measurements at Sea and Tritium/Helium-3 Measurements in a Lake", In Turbulent Fluxes through the Sea Surface, Wave Dynamics and Predictions. Plenum, New York. (1978), 151-165.
- Nelson, A. K. and Tai Y. C. 1999. "An Experimental Investigation of Incremental reactivities of Volatile Organic Compounds", Atmospheric Environment. 33(1999), 2101-2110.
- Olson, D. A., Stubbe, J. K. and Corsi, R. L. 2000 "A Mechanistic Model for Estimating VOC Emission from Industrial Process Drain Part I: The Underlying Channel", Environmental Progress. 19(2000),1-10
- Rathbun, R. E. and Tai, D. Y. 1989. "Volatilization of Benzene of Eight Alkyl-Substituted Benzene Compounds from Water", U. S. Geological Survey. (1989)
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M. Ad Poling, B. E., 1987. The Properties of Gases & Liquids. McGraw-Hill Book company, New York, NY, 577-631.

- Roberts, P. V., Munz, C. And Dandliker, P, 1984. Modeling Volatile Organic Solute Removal by Surface and bubble aeration", Process Research. 56(1984), 157-163.
- Sherwood, T. K., Pigford, R. L. and Wilke, C. R. 1975 Mass Transfer. McGraw-Hill Book company, New York, NY.
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M. And Imboden, D, M. 1993. "The Gas-Liquid Interface: Air-water Exchange", Environmental Organic Chemistry. Wiley-Interscience Publication, John Wiley and sons, New York, (1993), 215-254.
- Snider, J. R. and Dawson G. A. 1985. "Trospospheric Light Alcohol, Carbonyl and Acetonitile; Concentrations in the Southwestern United States and Henry' s Law data. Journal Geophysical Research,90D, (1985), 3797-3805.
(1991), 2785-2796.
- Staudinger, J. and Roberts, P. V. 1996. A Critical Review of Henry' s Law Constant of Environment Applications. Critical Research Environmental Science Technology. 26 (1996), 205
- Tamir, A. and Merchuk, J. C. 1978. "Effect of Diffusivity on Gas-side Mass Transfer Coefficient", Chemical Engineering Science. 33(1978),1371-1374.
- Wanninkhof, R. and Bliven, L. F. 1991. "Relation Between Gas Exchange, Wind Speed , and Radar backasatter in Large Wind-Wave Tank", Journal Geophysical Research. 96 (1991), 2785-2796.
- Wanninkhof, R., Ledwell, J. R. and Broecker, W. S. 1984. "Gas Exchange- Wind Speed Relation Measured with Sulfer Hexafluoride on a Lake", Science. 5(1984),1224-1226.

Wanninkhof, R., Ledwell, J. R. and Crusius, J. 1991. "Gas Transfer Velocities on Lake Measured with Sulfur Hexafluoride", An Air-water Mass Transfer, Wilhelm, S. C. Gulliver, J. S., Eds., American Society of Civil Engineers, New York, (1991), 441-458.

Whitman, W. G. 1923. Chem. Metall. Engng.

Wolff, C. J. M. and Hèijde van der, H. B. 1982 "A Model to Assess The Rate of Evaporation of Chemical Compounds from Surface Water", Chemosphere. 11(1982),103-117.

Wright, D. A., Sander, S. I. And DeVoll, D. 1992a. "Infinite Dilution Activity Coefficient and Solubilities Hydrocarbons in Water at Ambient Temperatures". Environmental Science Technology. 26(1992a), 1928-1831.

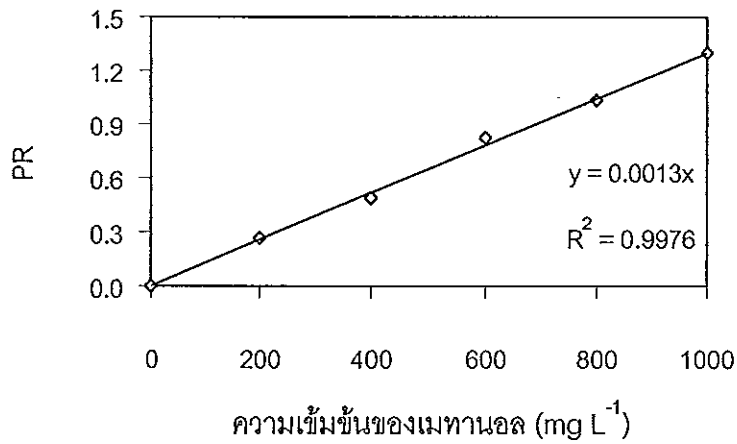
Yu, S. L. and Hamrich, J. M. 1984. "Wind Effects on Air-water Oxygen Transfer in a Lake", In Gas Transfer at Water Surface, edited by Brutsaert, W., Jirka, G. H., D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland. (1984), 357-367.

Zhou, X. and Mopper, K. 1990. "Apparent Partition Coefficient of 15 Carbonyl Compounds between Air and Sea Water and between Air and Freshwater; Implications for Air-Sea Exchange". Environmental Science Technology. 24(1990), 1864-1869.

ภาคผนวก

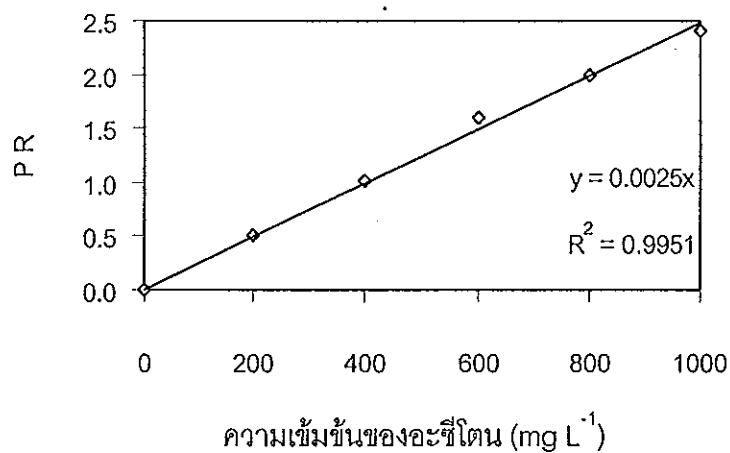
ภาคผนวก ก

Calibration Curve ของ VOC



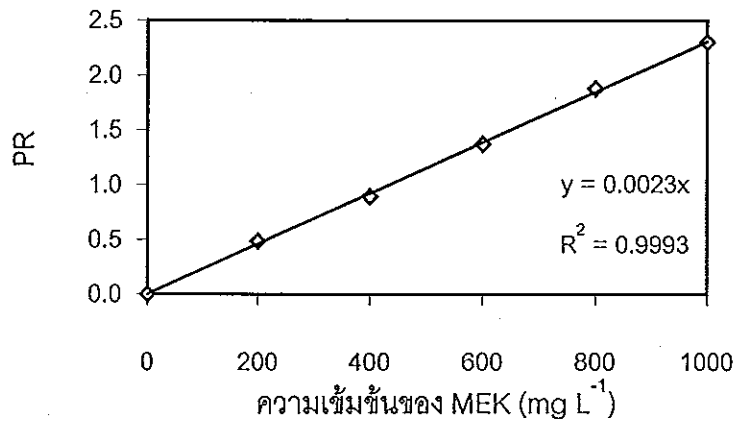
ภาพประกอบ 28 Calibration curve of Methanol-water solution

สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน 250 °C อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 300 °C
อุณหภูมิโวลูเม 80 °C ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด 2 μ L.



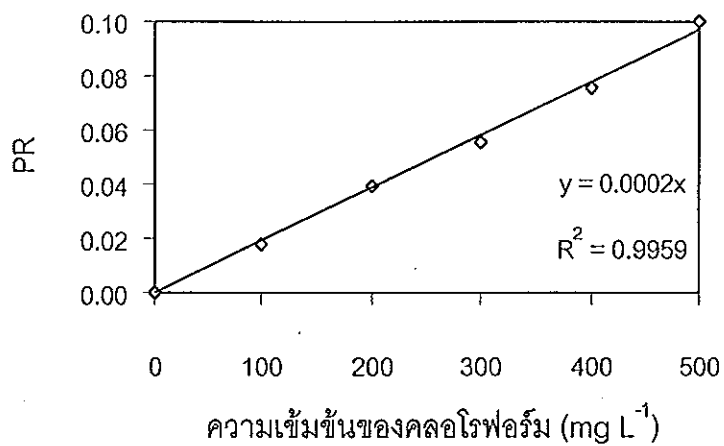
ภาพประกอบ 29 Calibration curve of Acetone-water solution

สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน 250 °C อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 300 °C
อุณหภูมิโวลูเม 80 °C ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด 2 μ L.



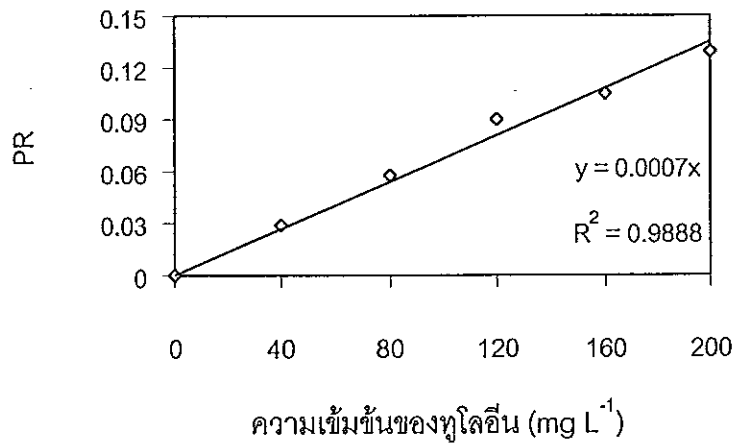
ภาพประกอบ 30 Calibration curve of MEK-water solution

สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน 250 °C อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 300 °C
อุณหภูมิโวลเวน 80 °C ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด 2 μ L.



ภาพประกอบ 31 Calibration curve of Chloroform-water solution

สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชัน 250 °C อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 300 °C
อุณหภูมิโวลเวน 80 °C ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด 2 μ L.



ภาพประกอบ 32 Calibration curve of Toluene-water solution

สภาวะ อุณหภูมิอินเจคชั่น 250 °C อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 300 °C
อุณหภูมิโอบเวน 80 °C ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีด 2 μ L.

ภาคผนวก ข

ความเข้มข้นของ VOC ที่ศึกษาที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของ
แหล่งน้ำคงที่ที่ $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ตาราง 2 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1099.33	1124.35	1113.63	1112.44	12.527
3600	1051.91	1090.57	1087.70	1076.73	21.541
7200	1049.20	1072.69	1060.26	1060.72	11.753
10800	1045.28	1064.23	1027.00	1045.50	18.616
14400	1030.90	1036.56	102.87	723.44	6.879
18000	1024.49	1031.19	1015.42	1023.70	7.914
21600	1022.49	1026.50	1009.60	1019.53	8.828
25200	1013.20	1012.52	999.91	1008.54	7.484
28800	985.29	988.01	974.90	982.73	6.919
32300	984.86	984.38	970.70	979.98	8.042
36000	982.62	983.97	964.61	977.07	10.808
39600	961.27	980.66	957.36	966.43	12.477
43200	921.13	947.46	937.42	935.34	13.287
46800	915.55	923.08	908.86	915.83	7.114

ตาราง 3 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10\text{cm}} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1085.29	1035.74	1090.54	1070.52	30.238
3600	1047.89	995.40	1032.66	1025.32	27.005
7200	990.50	968.88	1016.15	991.84	23.664
10800	951.33	936.26	977.84	955.14	21.050
14400	925.33	985.41	929.14	946.63	18.473
18000	880.62	873.21	909.58	887.80	19.219
21600	859.34	812.58	846.05	839.32	24.091
25200	855.47	795.63	831.22	827.44	30.101
28800	765.55	780.68	768.67	771.63	7.989
32300	731.96	767.91	730.08	743.32	21.318
36000	687.55	709.51	679.76	692.27	10.992
39600	680.74	655.13	684.65	673.51	16.037
43200	676.92	639.06	639.06	651.68	21.080

ตาราง 4 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1097.73	1162.90	1104.94	1121.86	35.727
3600	1012.17	993.66	974.90	993.58	18.3637
7200	933.26	964.94	949.15	949.12	15.838
10800	854.16	842.59	825.83	840.86	14.242
14400	757.25	766.08	746.37	756.57	9.873
18000	688.62	693.91	678.49	687.01	7.836
21600	593.89	641.17	626.42	620.49	24.191
25200	576.86	573.16	560.55	570.19	8.549
28800	560.92	56794.00	552.14	19302.35	7.916
32300	522.86	526.69	515.52	521.69	5.676
36000	474.12	478.39	452.91	468.47	13.648
39600	426.58	470.03	454.61	450.41	22.030
43200	378.95	387.77	382.49	383.07	4.438

ตาราง 5 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

$$\text{ที่ } U_{10\text{cm}} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1076.54	1061.18	1157.36	1098.36	51.671
7200	863.63	872.79	907.70	881.37	23.256
14400	688.11	700.76	687.82	692.23	7.390
21600	529.71	523.49	549.17	534.12	13.397
28800	419.71	396.77	418.09	411.52	12.801
36000	336.55	329.13	330.52	332.07	3.945
43200	268.96	260.20	265.94	265.03	4.451

ตาราง 6 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

$$\text{ที่ } U_{10\text{cm}} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1038.87	1060.56	1069.08	1056.17	15.770
3600	930.66	961.98	961.39	951.34	17.914
7200	779.49	801.21	772.91	784.54	14.810
10800	666.25	721.54	699.01	695.60	27.802
14400	556.06	585.44	578.21	573.24	15.307
18000	491.20	522.82	554.08	522.70	31.440
21600	371.47	437.79	450.31	419.86	42.371
25200	361.04	381.78	375.96	372.93	10.697
28800	350.64	332.19	364.68	349.17	16.298
32300	272.2	281.38	277.48	277.02	4.604
36000	226.24	244.61	241.36	237.40	9.806

ตาราง 7 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

$$\text{ที่ } U_{10\text{cm}} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1097.00	1096.23	1055.64	1082.96	23.746
3600	907.15	915.66	866.21	896.34	17.796
7200	737.00	741.46	708.65	729.04	17.769
10800	634.99	643.65	592.19	623.61	29.810
14400	506.15	516.56	494.37	505.69	11.102
18000	402.07	418.92	417.16	412.72	9.265
21600	351.91	347.21	333.51	344.21	9.556
25200	285.52	282.01	272.43	279.99	6.744
28800	239.71	260.26	249.8	249.92	10.277

ตาราง 8 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

$$\text{ที่ } U_{10\text{cm}} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	961.52	992.67	989.69	981.29	17.192
3600	750.98	791.63	827.92	790.18	38.490
7200	650.32	645.12	794.28	696.57	84.657
10800	528.82	513.28	521.02	521.04	7.771
14400	422.20	429.44	436.78	429.47	7.290
18000	341.73	337.55	343.41	340.90	3.018
21600	280.26	282.97	289.58	284.27	4.793
25200	214.00	221.5	220.75	218.75	4.133

ตาราง 9 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	950.00	930.08	967.81	949.30	18.876
7200	896.61	875.76	890.35	887.57	10.700
14400	818.15	780.01	843.23	813.80	31.831
21600	729.50	684.37	755.76	723.21	55.984
28800	670.17	618.67	681.40	656.75	33.449
36000	589.65	565.19	584.67	579.84	12.927
43200	459.16	438.04	489.44	462.21	25.833

ตาราง 10 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	990.98	980.26	998.52	989.92	9.176
3600	913.24	873.38	923.05	903.22	26.306
7200	804.27	777.17	814.48	798.64	19.282
10800	713.33	598.34	716.69	676.12	67.380
14400	629.61	671.98	625.68	642.42	25.672
18000	553.87	528.90	556.64	546.47	15.279
21600	457.02	465.87	477.38	466.76	12.207
25200	423.04	404.7	415.71	414.48	9.229
28800	383.65	364.06	376.24	374.65	9.89
32400	376.13	318.96	330.89	341.99	30.159
36000	328.45	277.06	292.88	299.46	26.319
39600	259.00	245.52	259.51	254.68	7.935

ตาราง 11 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	916.36	937.06	922.97	925.46	10.573
3600	685.31	717.52	757.86	720.23	36.352
7200	548.07	550.77	511.70	536.85	21.819
10800	399.33	421.84	402.40	407.86	7.082
14400	318.77	316.83	266.01	300.54	29.917
18000	231.91	240.11	228.78	233.60	5.851
21600	167.91	174.11	170.76	170.93	3.103
25200	126.65	130.41	140.00	132.35	6.884
28800	94.25	92.77	117.44	101.49	13.836

ตาราง 12 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1044.76	1034.01	1033.17	1037.31	6.463
3600	667.49	681.34	658.80	669.21	11.368
7200	396.16	405.42	396.24	399.27	6.359
10800	233.75	243.08	236.01	237.61	4.867
14400	169.40	153.14	146.35	156.30	11.845
18000	99.92	95.83	90.33	95.36	4.812
21600	62.63	60.67	62.49	61.93	1.093

ตาราง 13 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	970.87	932.09	1002.72	968.56	35.373
1800	688.51	703.66	683.17	691.78	10.631
3600	457.44	440.92	444.42	447.59	8.702
5400	320.62	316.62	329.37	322.20	6.518
7200	224.76	218.84	226.25	223.28	3.919
9000	158.32	157.63	161.91	159.29	2.298
10800	110.84	108.77	115.47	111.69	3.341

ตาราง 14 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1068.00	1026.55	1082.23	1058.93	28.973
3600	411.09	430.55	415.55	419.06	10.195
7200	185.16	175.04	191.23	183.81	8.179
10800	83.63	84.89	91.71	86.74	4.073
14400	41.84	42.97	43.60	42.80	0.910
18000	22.40	23.79	22.03	22.74	0.928

ตาราง 15 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$

เวลา) (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	986.48	965.55	948.36	966.80	19.094
3600	330.11	307.52	327.35	321.66	12.322
7200	113.16	109.07	115.53	112.59	3.271
10800	40.27	27.74	41.22	36.41	7.523
14400	15.03	14.76	14.82	14.87	0.144

ตาราง 16 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	766.38	721.99	744.49	744.29	22.195
3600	444.45	387.41	409.32	413.73	30.734
7200	257.66	235.69	260.05	251.13	13.426
10800	142.57	125.27	137.23	135.02	8.858
14400	56.52	47.86	65.86	56.75	9.002

ตาราง 17 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	538.95	575.22	595.24	569.80	28.535
3600	315.68	339.61	297.86	317.72	20.951
7200	222.91	220.38	224.30	222.53	1.986
10800	137.87	154.51	159.56	150.65	11.349
14400	107.08	117.46	97.56	107.37	9.955
18000	95.18	84.74	73.98	84.63	10.599

ตาราง 18 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	576.52	608.64	502.45	562.54	55.503
1800	446.34	459.89	444.06	450.10	8.559
3600	332.93	330.33	330.35	331.20	1.497
5400	274.33	266.90	274.52	271.92	4.347
7200	219.93	208.47	209.26	212.55	6.403
9000	164.45	187.61	171.7	174.59	11.845
10800	141.96	139.79	139.9	140.55	1.536
12600	112.65	109.51	109.16	110.44	1.922

ตาราง 19 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	627.52	647.43	633.93	636.29	10.161
1800	491.08	460.65	469.24	473.66	15.688
3600	367.74	276.65	327.28	323.89	45.642
5400	246.61	197.10	248.12	230.61	29.031
7200	139.51	135.91	153.21	142.88	9.126
9000	100.05	96.75	86.1	94.30	7.292

ตาราง 20 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10\text{cm}} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	572.21	519.25	548.82	546.76	26.536
1800	368.04	378.24	368.04	371.44	5.891
3600	222.87	202.28	222.87	216.01	11.886
5400	175.46	170.94	175.46	173.95	2.611
7200	96.89	109.18	96.89	100.99	7.094
9000	92.61	85.55	92.61	90.26	4.075

ตาราง 21 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10\text{cm}} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	653.81	706.97	611.81	657.53	47.692
600	421.41	425.25	475.55	440.74	30.212
1200	276.92	293.89	303.48	291.43	13.449
1800	196.25	181.57	192.60	190.14	7.646
2400	114.51	112.68	142.76	123.32	16.863

ตาราง 22 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10\text{cm}} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	619.94	669.80	693.85	661.20	37.697
900	480.50	435.37	470.28	462.05	13.696
1800	268.71	235.74	221.20	241.88	24.347
2700	169.91	147.36	157.33	158.20	11.300
3600	103.26	112.67	102.32	106.08	5.725

ตาราง 23 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	292.57	33.03	332.31	319.30	23.151
3600	221.43	190.25	218.08	209.92	17.117
7200	144.32	167.88	166.37	159.52	13.187
10800	76.85	88.60	109.83	91.76	16.718
14400	57.80	68.77	78.77	68.45	10.489
18000	29.73	34.21	28.00	30.65	3.205
21600	23.11	20.95	19.89	21.31	1.644

ตาราง 24 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 0.46 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	106.29	102.18	105.21	319.30	2.659
3600	59.65	55.21	67.36	209.92	17.344
7200	52.18	41.04	44.10	159.52	7.057
10800	21.21	27.93	23.85	91.76	3.588
14400	17.64	17.09	17.50	68.45	0.357

ตาราง 25 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	217.30	218.30	217.97	319.30	0.511
3600	126.84	116.55	132.25	209.92	7.974
7200	69.68	64.77	67.19	159.52	2.456
10800	48.48	52.30	45.76	91.76	3.285
14400	17.25	17.24	23.00	68.45	3.322

ตาราง 26 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	189.59	174.93	173.02	179.18	9.038
1800	145.11	140.76	160.07	148.65	10.127
3600	90.37	102.81	70.55	87.91	16.269
5400	64.89	63.85	59.20	62.65	3.031
7200	46.90	37.31	44.51	42.91	4.993
9000	34.08	31.32	31.43	32.28	1.560
10800	30.84	21.68	23.52	25.35	4.846
12600	16.18	18.05	17.47	17.23	0.958

ตาราง 27 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 3.37 \text{ m s}^{-1}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	311.04	330.18	315.99	319.07	9.937
900	165.70	174.76	179.91	173.46	7.196
1800	96.55	98.06	94.19	96.27	1.952
2700	51.73	49.23	48.13	49.70	1.843
3600	25.39	28.90	20.12	24.80	4.420

ตาราง 28 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

$$\text{ที่ } U_{10\text{cm}} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	129.47	118.09	138.76	128.77	10.352
900	64.77	59.01	64.20	62.66	3.173
1800	44.98	51.39	47.88	48.08	3.210
2700	16.61	29.44	21.72	22.59	6.462
3600	11.79	17.07	17.51	15.46	3.178

ตาราง 29 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง

$$\text{ที่ } U_{10\text{cm}} = 4.80 \text{ m s}^{-1}$$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	79.09	72.08	87.22	79.46	7.579
600	49.10	52.51	60.07	53.89	5.618
1200	32.43	31.89	40.36	34.89	4.738
1800	20.66	24.96	23.50	23.04	2.190

ภาคผนวก ค

ความเข้มข้นของ VOC ที่ศึกษาจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิต่ำ
ของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนที่ความเร็วลมคงตัวที่ 0 m s^{-1}

ตาราง 30 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1018.75	981.10	992.34	997.40	19.325
7200	955.26	951.86	943.27	950.13	6.181
14400	921.15	903.32	914.40	912.96	8.999
21600	889.07	848.88	851.63	863.19	22.45
28800	840.53	814.76	848.73	834.67	17.731
36000	783.22	785.49	801.18	789.96	9.781
43200	766.54	760.37	766.59	764.50	3.574
50400	743.38	740.42	754.14	745.98	7.219

ตาราง 31 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1254.67	1259.33	1295.57	1269.86	22.389
7200	1232.21	1232.87	1227.16	1230.75	3.123
14400	1146.97	1185.21	1134.04	1155.41	26.609
21600	1057.50	1067.80	1018.40	1047.90	32.597
28800	960.18	944.65	976.60	960.48	17.514
36000	927.11	927.45	876.34	910.30	29.411
43200	803.04	831.56	828.97	821.19	15.772

ตาราง 32 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1016.89	998.94	1009.59	1008.47	9.024
7200	918.50	930.25	928.07	925.61	6.252
14400	845.60	825.94	785.52	819.02	30.635
21600	735.80	724.65	759.12	739.86	17.593
28800	645.51	635.85	621.18	634.18	12.248
36000	592.08	591.59	586.08	589.92	3.344
43200	551.51	525.07	517.15	531.24	17.995

ตาราง 33 ความเข้มข้นของเมทานอลในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของเมทานอล (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1006.96	981.83	1015.99	1001.59	17.701
7200	886.65	886.36	872.61	881.87	8.026
14400	769.02	763.75	474.55	669.11	11.189
21600	683.44	618.16	621.62	641.07	36.728
28800	542.74	520.38	553.01	538.71	16.684
36000	471.14	467.78	470.63	469.85	1.807
43200	421.31	407.02	407.37	411.90	8.152

ตาราง 34 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	919.71	915.06	936.15	923.64	11.081
7200	746.36	733.60	752.79	744.25	9.771
14400	616.84	607.68	620.16	614.89	6.463
21600	507.52	510.43	507.15	508.37	1.799
28800	416.77	409.66	418.97	415.13	4.864
36000	342.80	351.29	358.26	350.78	7.743
43200	273.97	286.15	282.20	280.77	6.213

ตาราง 35 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำ 35 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	954.66	911.37	926.61	930.88	21.961
5400	743.83	722.51	741.25	735.86	11.64
10800	586.89	575.55	457.23	539.89	71.808
16200	441.09	423.20	441.38	435.22	10.414
21600	340.30	341.24	339.28	340.27	0.978
27000	268.72	261.11	267.77	265.87	4.148
32400	214.01	215.36	213.45	214.27	0.979
37800	161.66	158.01	170.44	163.37	6.389

ตาราง 36 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	966.94	973.63	980.94	973.84	6.998
3600	782.22	751.18	774.21	769.20	16.111
7200	616.16	613.53	637.79	622.49	13.311
10800	500.18	495.37	497.86	497.80	2.404
14400	396.11	402.88	400.46	399.82	3.43
18000	328.64	321.02	324.55	324.74	3.812
21600	259.09	264.40	255.11	259.53	4.658
25200	208.4	208.59	211.05	209.35	1.478

ตาราง 37 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	916.28	906.25	894.74	905.76	10.78
3600	740.38	736.22	741.47	739.36	2.769
7200	544.05	543.03	544.28	543.79	0.665
10800	415.15	408.57	394.96	406.23	10.298
14400	294.82	292.56	291.72	293.03	1.604
18000	225.94	225.23	223.34	224.84	1.346
21600	179.76	167.94	169.76	172.49	6.366
25200	130.24	129.2	125.44	128.29	2.525

ตาราง 38 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของ MEK (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1109.56	1105.47	1069.67	1094.90	21.946
5400	974.11	970.05	976.87	973.68	4.935
10800	894.60	857.10	897.24	882.98	22.452
16200	841.53	825.91	853.78	840.41	13.971
21600	751.73	719.28	713.34	728.12	20.663
27000	651.67	673.46	659.18	661.44	11.068
32400	560.93	570.61	592.45	574.66	16.144

ตาราง 39 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของ MEK (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	975.85	951.99	988.98	972.27	18.754
5400	749.53	690.43	679.02	706.33	37.851
10800	532.80	527.36	552.49	537.55	13.221
16200	409.63	388.50	386.31	394.81	12.879
21600	297.56	310.93	287.09	298.53	11.953
27000	218.75	216.82	215.99	217.19	1.775

ตาราง 40 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของ MEK (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1016.87	1034.53	962.95	1004.78	37.286
5400	766.52	767.02	821.02	784.85	31.325
10800	633.55	589.50	616.38	613.15	22.207
16200	442.98	425.91	412.81	427.23	15.109
21600	289.21	308.29	308.83	302.11	11.173
27000	223.25	215.84	236.65	225.25	10.551

ตาราง 41 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของ MEK (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1100.07	1098.87	1081.80	1093.58	10.221
1200	924.41	962.93	969.20	952.18	24.257
2400	903.91	883.62	920.52	902.69	18.481
3600	822.29	809.76	864.63	832.22	28.753
4800	721.60	710.52	733.56	721.89	11.526
6000	646.59	617.71	633.60	632.63	14.462
7200	622.44	547.48	597.81	589.24	38.205
8400	540.45	514.68	540.68	531.94	14.945
9600	477.27	474.37	476.44	476.02	1.545
10800	401.25	414.83	419.84	411.97	9.620

ตาราง 42 ความเข้มข้นของ MEK ในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของ MEK (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	907.49	958.39	947.05	937.65	26.721
2400	729.41	708.07	704.11	713.87	13.611
4800	58.54	555.67	530.14	381.45	15.635
7200	326.55	350.37	339.89	338.94	11.398
10800	262.93	256.41	264.58	261.31	4.317
13200	193.74	195.52	188.47	192.58	3.665
15600	138.13	137.55	130.21	135.30	4.413

ตาราง 43 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	578.36	627.68	622.63	609.56	27.135
3600	353.68	385.78	320.67	353.38	32.556
7200	231.15	204.60	232.20	222.65	15.643
10800	119.02	113.78	88.24	107.01	16.419
14400	86.41	85.81	68.55	80.26	10.146

ตาราง 44 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	610.91	589.10	597.82	599.28	10.977
1800	376.70	350.09	351.30	359.36	15.029
3600	271.27	263.34	236.30	256.97	18.355
5400	176.26	160.07	182.46	172.93	11.561
7200	123.54	117.03	114.24	118.27	4.773
9000	98.20	104.66	78.40	93.75	13.682

ตาราง 45 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	933.92	844.40	935.85	904.72	52.252
900	714.20	691.10	685.55	696.95	15.197
1800	563.09	499.54	540.06	534.23	26.268
2700	425.88	346.00	448.82	406.90	43.933
3600	322.14	266.01	357.45	315.20	46.112
4500	301.64	280.33	277.74	286.57	10.705
5400	244.34	234.72	214.61	231.22	15.168

ตาราง 46 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม (mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	620.86	549.27	585.14	585.09	35.793
600	444.08	503.04	489.36	478.83	30.856
1200	409.27	379.65	421.94	403.62	21.705
1800	319.52	294.10	353.51	322.38	29.809
2400	264.89	239.02	234.10	246.00	16.541
3000	222.73	215.27	212.73	216.91	5.200
3600	191.29	102.27	171.9	155.15	46.815

ตาราง 47 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 30 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน(mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	397.06	358.87	394.00	383.31	21.223
1500	274.39	212.87	227.71	238.32	32.21
3000	189.29	183.90	164.44	179.21	13.072
4500	183.70	73.48	68.06	108.41	65.252
6000	57.17	64.35	56.06	59.19	4.500
7200	32.46	30.05	29.42	30.64	1.606

ตาราง 48 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 35 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน(mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	422.92	395.81	403.57	407.43	13.965
1200	323.12	236.38	274.92	278.14	43.461
2400	239.14	201.38	217.74	219.42	19.164
3600	1229.14	184.79	165.20	526.38	28.228
4800	109.87	107.55	94.31	103.91	8.394
6000	54.38	63.9	68.27	62.18	7.099
7200	49.75	26.62	31.89	36.09	12.122

ตาราง 49 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน(mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	416.30	467.58	463.00	448.96	28.378
900	288.08	305.91	294.49	296.16	9.033
1800	213.63	249.72	245.85	236.40	19.814
2700	176.03	135.38	221.01	177.47	42.682
3600	94.03	110.92	94.31	99.75	9.672
4500	81.66	87.31	68.27	79.08	9.778
5400	50.48	57.41	31.89	46.59	13.195

ตาราง 50 ความเข้มข้นของทุโลอินในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 45 °C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของทุโลอิน(mg L ⁻¹)				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	556.81	598.01	542.29	565.70	28.901
900	396.33	448.71	407.01	417.35	27.683
1800	313.44	289.02	340.50	314.32	25.752
2700	153.83	114.76	148.83	139.14	21.264
3600	131.47	104.41	109.06	114.98	11.815
4500	100.24	72.47	77.84	83.52	14.730

ภาคผนวก ง

ความเข้มข้นของ VOC ที่ศึกษาจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ
ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน

ตาราง 51 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $31.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1004.36	956.11	1014.81	991.76	31.312
2400	694.16	677.67	725.59	699.14	24.141
4800	507.57	477.14	482.78	489.16	16.187
7200	337.79	321.44	330.59	329.94	8.192
9600	250.91	234.44	242.41	242.59	6.728
12000	174.99	171.49	183.63	176.70	6.247
14400	131.63	124.08	128.79	128.17	3.813

ตาราง 52 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $31.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	923.47	935.27	899.89	919.54	18.015
1800	648.20	647.11	711.78	669.03	37.030
3600	472.57	475.75	507.60	485.31	19.374
5400	317.54	332.03	354.88	334.82	18.824
7200	220.72	231.67	245.34	232.58	12.332
9000	162.31	160.99	169.96	164.42	4.842
10800	117.67	116.04	133.08	122.26	9.398

ตาราง 53 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 31.5°C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1025.07	951.90	936.01	970.99	47.500
1200	653.98	658.37	631.87	648.07	14.203
2400	369.67	358.15	408.02	378.61	26.112
3600	242.68	241.42	263.59	249.23	12.451
4800	161.72	166.73	184.95	171.13	12.228
6000	110.36	109.21	114.36	111.31	2.702
7200	68.87	74.08	77.20	73.38	4.212

ตาราง 54 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 1.52 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 33.5°C

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	981.97	916.29	908.68	935.65	40.299
2400	631.13	586.01	617.96	611.70	23.199
4800	406.53	413.54	545.49	455.19	25.902
7200	264.90	258.42	276.94	266.75	9.399
9600	183.23	170.97	172.17	175.46	6.756
12000	111.03	109.91	118.82	113.25	4.854

ตาราง 55 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 2.58 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $33.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1029.39	1026.17	1007.10	1020.89	12.048
1200	737.36	738.54	801.05	758.98	36.437
2400	577.01	549.20	594.44	573.55	15.992
3600	410.89	418.05	438.02	422.32	14.059
4800	309.26	305.05	237.77	284.03	12.089
6000	229.37	227.05	224.77	227.06	2.300
7200	167.90	167.06	157.95	164.30	5.505

ตาราง 56 ความเข้มข้นของอะซีโตนในแหล่งน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลอง
ที่ $U_{10cm} = 4.21 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ $33.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เวลา (s)	ความเข้มข้นของอะซีโตน (mg L^{-1})				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1043.76	1018.83	1038.89	1033.83	13.214
900	700.48	707.08	743.95	717.17	23.426
1800	466.28	471.40	514.49	484.06	26.482
2700	342.20	315.49	311.24	322.98	16.785
3600	211.49	212.45	225.93	216.62	8.071
4500	152.28	152.26	209.82	171.45	33.229
5400	103.97	103.43	179.71	129.04	43.885

ภาคผนวก จ

ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบล็อกของ VOC ที่ศึกษา

ตาราง 57 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของเมทานอลจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ
ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลมเหนือ ผิวน้ำ ($m s^{-1}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้น สุดท้าย ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก ($mg L^{-1}$)
0.00	46800	1106.60	904.62	1002.22
0.46	43200	1070.50	651.69	843.84
1.52	43200	1119.34	385.21	688.23
2.58	39600	1040.37	329.36	618.38
3.37	36000	1047.80	235.63	544.28
4.21	28800	1085.00	248.24	567.32
4.79	28800	1180.51	166.558	517.75

ตาราง 58 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของอะซีโตนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ
ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยน และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลมเหนือ ผิวน้ำ ($m s^{-1}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้น สุดท้าย ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก ($mg L^{-1}$)
0.00	32400	960.75	568.6	1002.22
0.46	39600	989.92	254.68	843.84
1.52	28800	921.78	97.65	688.23
2.58	21600	1028.81	60.84	618.38
3.37	21600	1076.13	25.99	544.28
4.21	21600	1043.30	9.94	567.32
4.79	14400	966.80	14.87	517.75

ตาราง 59 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของคลอโรฟอร์มจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ
ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยน และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลมเหนือ ผิวน้ำ ($m s^{-1}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้น สุดท้าย ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก ($mg L^{-1}$)
0.00	18000	532.54	84.27	243.14
0.46	18000	569.80	84.63	254.42
1.52	12600	546.2	110.44	272.60
2.58	9000	636.29	94.30	283.89
3.37	54000	587.67	115.90	290.60
4.21	3600	661.20	106.09	303.37
4.79	2400	657.53	123.31	319.17

ตาราง 60 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของทุโลอินจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่ความเร็ว
ลมแปรเปลี่ยน และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลมเหนือ ผิวน้ำ ($m s^{-1}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้น สุดท้าย ($mg L^{-1}$)	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก ($mg L^{-1}$)
0.00	21600	311.23	20.84	107.40
0.46	14400	105.21	17.5	48.89
1.52	14400	210.75	18.18	78.59
2.58	12600	180.75	16.35	68.42
3.37	7200	310.05	24.66	112.74
4.21	3600	127.38	17.13	54.95
4.79	1800	79.46	23.04	45.57

ตาราง 61 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของเมทานอลจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำ
ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg L^{-1})	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg L^{-1})	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก (mg L^{-1})
25	46800	1106.60	904.62	1002.22
30	50400	997.40	745.98	865.61
35	43200	1269.85	821.19	1029.27
40	43200	1008.47	531.24	744.54
45	43200	1001.59	411.90	663.64

ตาราง 62 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของอะซีโตนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่
อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg L^{-1})	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg L^{-1})	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก (mg L^{-1})
25	43200	949.90	462.21	676.79
30	43200	923.64	280.77	539.87
35	37800	930.88	163.37	441.07
40	25200	973.84	209.34	497.30
45	25200	905.76	128.30	397.80

ตาราง 63 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของ MEK จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่
อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg L^{-1})	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg L^{-1})	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก (mg L^{-1})
25	32400	1094.90	574.66	807.03
30	36000	972.27	216.92	503.53
35	27000	1004.78	225.25	521.19
40	10800	1039.58	411.97	698.19
45	15600	937.65	135.30	414.46

ตาราง 64 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของคลอโรฟอร์มจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่
อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน และความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg L^{-1})	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg L^{-1})	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก (mg L^{-1})
25	21600	311.23	20.84	107.41
30	7200	383.31	30.64	139.59
35	7200	407.43	36.09	153.20
40	5400	448.96	46.59	177.61
45	4500	565.70	83.51	252.05

ตาราง 66 ความเข้มข้นเฉลี่ยแบบลึอกของอะซีโตนจากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่
ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	ความเร็วลมเหนือ ผิวน้ำ (ms-1)	เวลาสำหรับ การระเหย (s)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg l ⁻¹)	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg L ⁻¹)	ความเข้มข้นเฉลี่ย แบบลึอก (mg L ⁻¹)
31.5	1.52	14400	991.76	128.17	422.06
	2.58	10800	919.55	122.27	395.15
	4.21	7200	971.00	73.38	347.56
33.5	1.52	12000	935.65	113.25	389.46
	2.58	7200	1020.89	164.30	468.92
	4.21	5400	1033.82	129.065	434.80

ภาคผนวก ฉ

การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลอง

ตาราง 67 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลม ($m s^{-1}$)	$K_{OL} (m s^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล	ผลการทดลอง	
0.00	2.58	1.15	-55.43
0.46	4.25	2.74	-35.53
1.52	7.29	6.39	-12.35
2.58	9.87	11	11.45
3.37	14.95	14.33	-4.15
4.21	19.78	17.95	-9.25
4.79	22.95	24.31	5.93

ตาราง 68 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลม ($m s^{-1}$)	$K_{OL} (m s^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล	ผลการทดลอง	
0.00	8.13	8.70	6.55
0.46	9.21	9.64	4.46
1.52	11.45	10.37	-10.41
2.58	13.64	16.7	18.32
3.37	25.86	25.36	-1.97
4.21	39.35	41.77	5.79
4.79	48.63	56.49	13.91

ตาราง 69 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิ (°C)	$K_{OL} (\text{m s}^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล	ผลการทดลอง	
25	1.45	1.15	-20.69
30	2.16	2.24	3.70
35	3.19	3.77	18.18
40	4.68	5.00	6.84
45	6.83	6.28	-8.05

ตาราง 70 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิ (°C)	$K_{OL} (\text{m s}^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล	ผลการทดลอง	
25	2.26	1.58	-30.09
30	3.26	3.39	3.99
35	4.68	4.42	-5.56
40	6.69	7.15	6.88
45	9.51	10.02	5.36

ตาราง 71 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$K_{OL} (\text{m s}^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล	ผลการทดลอง	
25	8.20	8.70	5.75
30	11.66	12.05	3.24
35	16.55	18.42	10.15
40	23.49	21.80	-7.75
45	33.32	27.36	-21.78

ตาราง 72 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน

ความเร็วลม (m s^{-1})	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$K_{OL} (\text{m s}^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
		ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล	ผลการทดลอง	
1.52	25.0	5.85	6.39	8.53
	31.5	9.63	11.81	18.49
	33.5	12.20	14.24	21.35
2.58	25.0	8.09	11	26.43
	31.5	13.27	15.34	13.49
	33.5	15.42	20.31	24.06
4.21	25.0	15.35	17.95	14.49
	31.5	25.44	29.56	13.95
	33.5	19.65	34.41	13.84

ตาราง 73 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของอะซีโตนที่ได้จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำใน สภาวะเดียวกัน กับ K_{OL} ของอะซีโตนที่ระเหยจากแหล่งน้ำภายใต้สภาวะมี VOC อื่นด้วย

ความเร็วลม ($m s^{-1}$)	$K_{OL} (m s^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด %
	อะซีโตน	จากสารละลายผสม ระหว่างอะซีโตนกับ MEK	
0.46	2.74	5.56	-50.72
2.58	11.00	13.08	-15.90
4.79	24.31	27.45	-11.44

ตาราง 74 การเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ของ MEK ที่ได้จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำที่ สภาวะเดียวกัน กับ K_{OL} ของ MEK ที่ระเหยจากแหล่งน้ำภายใต้สภาวะมี VOC อื่นด้วย

ความเร็วลม ($m s^{-1}$)	$K_{OL} (m s^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด %
	MEK	จากสารละลายผสม ระหว่างอะซีโตนกับ MEK	
0	1.58	1.2	31.67
0.046	7.12	6.53	9.04
2.58	16.42	14.35	14.43
4.21	30.1	29.01	3.76

ภาคผนวก ช

การเปรียบเทียบระหว่าง N_{VOC} ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลอง

ตาราง 75 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลม (m s^{-1})	$N_{\text{voc}} (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม	ผลการทดลอง	
0	1.96	0.94	-52.04
40.46	2.3	1.52	-33.91
1.52	2.68	2.34	-12.69
2.58	3.38	3.66	8.28
3.37	4.22	3.97	-5.92
4.21	4.39	3.91	-10.93
4.79	5.23	5.40	3.25

ตาราง 76 การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{voc} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่ความเร็วลมแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25 °C

ความเร็วลม (m s^{-1})	$N_{\text{voc}} (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม	ผลการทดลอง	
0	1.98	2.03	2.46
40.46	2.34	2.2	-6.36
1.52	3.12	2.82	-10.64
2.58	3.87	4.92	21.34
3.37	7.51	7.13	-5.33
4.21	11.94	12.59	5.16
4.79	15.52	18.17	14.58

ตาราง 77 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิ (°C)	$N_{voc} (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม	ผลการทดลอง	
25	1.96	0.94	-52.04
30	1.17	1.14	-2.56
35	1.41	1.16	-17.73
40	2.33	2.33	0.00
45	2.72	2.37	-12.87

ตาราง 78 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิ (°C)	$N_{voc} (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม	ผลการทดลอง	
25	1.82	1.23	-32.42
30	1.64	1.61	-1.86
35	2.44	2.22	-9.91
40	4.67	4.81	2.91
45	3.94	3.96	0.51

ตาราง 79 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ของคลอโรฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยนและความเร็วลมเท่ากับ 0 m s^{-1}

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$N_{voc} (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด (%)
	ทำนายด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม	ผลการทดลอง	
25	1.99	2.03	1.97
30	3.04	2.83	-7.42
35	4.51	4.32	-4.40
40	11.60	7.46	-55.50
45	10.80	9.18	-17.65

ตาราง 80 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{voc} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิของแหล่งน้ำแปรเปลี่ยน

ความเร็วลม (m s^{-1})	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$N_{voc} (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}) \times 10^6$		ความผิดพลาด (%)
		ทำนายด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม	ผลการทดลอง	
1.52	25.0	2.68	2.34	-14.53
	31.5	4.06	4.61	11.93
	33.5	4.36	5.27	17.27
2.58	25.0	3.38	3.66	7.65
	31.5	5.24	5.68	7.75
	33.5	7.23	9.15	20.98
4.21	25.0	4.39	3.91	-12.28
	31.5	8.84	9.59	7.82
	33.5	12.9	12.9	0.00

ตาราง 81 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{VOC} ของอะซีโตนที่ได้จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำใน สภาวะเดียวกับ N_{VOC} ของอะซีโตนที่ได้จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำภายใต้ สภาวะที่มี VOC อื่นด้วย

ความเร็วลม ($m s^{-1}$)	$N_{VOC} (g m^{-2} s^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด %
	อะซีโตน	จากสารละลายผสม ระหว่างอะซีโตนกับ MEK	
0.46	2.47	1.74	29.55
2.58	7.01	4.50	35.81
4.79	10.15	8.90	12.32

ตาราง 82 การเปรียบเทียบระหว่าง N_{VOC} ของ MEK ที่ได้จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำใน สภาวะเดียวกับ N_{VOC} ของ MEK ที่ได้จากกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำภายใต้ สภาวะที่มี VOC อื่นด้วย

ความเร็วลม ($m s^{-1}$)	$N_{VOC} (g m^{-2} s^{-1}) \times 10^3$		ความผิดพลาด %
	MEK	จากสารละลายผสม ระหว่างอะซีโตนกับ MEK	
0	1.14	2.57	-55.64
0.46	2.88	2.88	0.00
2.58	6.39	5.34	16.43
4.21	10.9	10.16	6.79

ภาคผนวก ซ

สมบัติทางกายภาพของ VOC

1. ค่าคงที่ของเฮนรี (H)

$$k_H = k_H \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{solution}}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\theta}\right)\right)$$

$$\frac{d \ln k_H}{d \frac{1}{T}} = -\frac{\Delta H_{\text{solution}}}{R}$$

$$H = \frac{1}{k_H}$$

เมื่อ H = ค่าคงที่ของเฮนรี (atm m³ mol⁻¹)

T = อุณหภูมิของน้ำ (K)

T^θ = อุณหภูมิอ้างอิงของน้ำ (K)

= 298.15 (K)

ΔH_{solution} = เอนทัลปีของสารละลาย

R = ค่าคงที่สากลของแก๊ส (g cm² sec⁻² mol⁻¹ K⁻¹)

K_H = ส่วนกลับของค่าคงที่ของเฮนรี (mol m³ atm⁻¹)

ตาราง 83 ค่าคงที่ของเฮนรีของ VOC ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของเฮนรี, H (atm m ³ mol ⁻¹)				
	เมทานอล	อะซีโตน	MEK	คลอโรฟอร์ม	โทลูอีน
25	4.545 × 10 ⁻⁶	3.333 × 10 ⁻⁵	5.000 × 10 ⁻⁵	3.846 × 10 ⁻³	6.667 × 10 ⁻³
30	6.060 × 10 ⁻⁶	4.299 × 10 ⁻⁵	6.593 × 10 ⁻⁵	4.799 × 10 ⁻³	8.318 × 10 ⁻³
35	8.005 × 10 ⁻⁶	5.499 × 10 ⁻⁵	8.616 × 10 ⁻⁵	5.944 × 10 ⁻³	1.030 × 10 ⁻²
40	1.048 × 10 ⁻⁵	6.980 × 10 ⁻⁵	1.116 × 10 ⁻⁴	7.313 × 10 ⁻³	1.268 × 10 ⁻²
45	1.361 × 10 ⁻⁵	8.792 × 10 ⁻⁵	1.435 × 10 ⁻⁴	8.939 × 10 ⁻³	1.549 × 10 ⁻²

2. น้ำหนักโมเลกุลของ VOC ที่ศึกษา

ตาราง 84 น้ำหนักโมเลกุลของ VOC ที่สนใจ

สารประกอบ อินทรีย์	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล (g mol ⁻¹)
เมทานอล	CH ₄	32.042
อะซีโตน	C ₃ H ₆ O	58.08
MEK	C ₄ H ₈ O	72.107
คลอโรฟอร์ม	CHCl ₃	119.387
โทลูอีน	C ₇ H ₈	92.141

3. ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระยะ 10 cm เหนือผิวน้ำ

ความถี่ (Hz)	U _{10cm} (m s ⁻¹)
10	0.46
20	1.52
30	2.58
40	3.37
50	4.21
60	4.79

ภาคผนวก ฅ

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิญภาคของเหลว (K_{OL}) ที่ได้จากการระเหยเมทานอลจากแหล่งน้ำสำหรับการทดลองที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 25°C

จากการทำดุลมวลรอบถังระเหยจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{C_{L,t}}{C_{L,0}}\right) = -\frac{K_{OL}}{h} t$$

เมื่อ K_{OL} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิญภาคของเหลว (m s^{-1})

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวิญภาคของเหลวที่เวลา t (mg L^{-1})

$C_{L,0}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวิญภาคของเหลวตอนเริ่มต้น (mg L^{-1})

t = เวลาสำหรับการระเหย (s)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(C_{L,t}/C_{L,0})$ กับ t โดยให้ Linear regression จะได้

$$-\frac{K_{OL}}{h} = 4.186 \times 10^{-8}$$

และ $h = 7.692 \text{ cm}$.

ดังนั้นจะได้ค่า $K_{OL} = 3.22 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$

2. การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิญภาคของเหลว (K_{OL}) โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_L} + \frac{RT}{HK_G}$$

เมื่อ K_{OL} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิญภาคของเหลว (m s^{-1})

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (m s^{-1})

k_G = ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (m s^{-1})

H = ค่าคงที่ของเฮนรี ($\text{atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$)

R = ค่าคงที่ของแก๊สสากล

T = อุณหภูมิของน้ำ (K)

จากทฤษฎีนี้จะเห็นได้ว่าค่า K_{OL} เป็นฟังก์ชันกับ k_G , k_L และ H ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้

การคำนวณค่า K_{OL} ของอะซีไตนที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 25°C

2.1 การคำนวณค่าคงที่ของเฮนรี (H)

$$K_H = K_H^\circ \left(-\frac{\Delta H_{solution}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

เมื่อ $K_H^\circ = 30 \text{ mol L}^{-1} \text{ atm}^{-1}$ (Staudinger and Roberts, 1996)

$$\frac{d \ln K_H}{d \left(\frac{1}{T} \right)} = -\frac{\Delta H_{solution}}{R} = 4600$$

$$K_H = 30 \exp \left(4600 \left(\frac{1}{303.15} - \frac{1}{298.15} \right) \right)$$

$$H = \frac{1}{K_H} = 4.30 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$$

2.2 การคำนวณค่า k_L และค่า k_G จากสมการ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ

จากสมการ (3.11) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} k_L &= \left(2.33 \times 10^{-6} + 9.71 \times 10^{-6} \right) (1.072)^{30-25} \left(\frac{92.14}{58.080} \right)^{0.5} \\ &= 1.7964 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

และจากสมการ (3.12) จะได้ว่า

$$k_G = (4.73 \times 10^{-3} + 2.25 \times 10^{-3})(1.034)^{30-25} \left(\frac{92.14}{58.080} \right)^{0.5}$$

$$= 1.422 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

2.3 การคำนวณค่า K_{OL}

จากทฤษฎีสองฟิล์มจะได้ว่า

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{1.7694 \times 10^{-5}} + \frac{(8.21 \times 10^{-5})(303.15)}{(4.30 \times 10^{-5})(1.422 \times 10^{-3})}$$

$$= 463585.78$$

$$K_{OL} = 2.16 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$$

3. การคำนวณฟลักซ์การระเหย (N_{VOC})

ฟลักซ์การระเหยของ VOC เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งสามารถประมาณค่าฟลักซ์ได้สองวิธี คือใช้ทฤษฎีสองฟิล์มและวัดได้โดยตรงจากการทดลอง โดยการทำสมดุลมวลรอบถังระเหย

การเปรียบเทียบระหว่างค่า N_{VOC} ของอะซีโตนที่ $U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 25°C

3.1 โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม

$$N_{VOC, average} = K_{OL} C_{lm}$$

โดย
$$C_{lm} = \frac{C_{L,f} - C_{L,o}}{\ln \frac{C_{L,f}}{C_{L,o}}}$$

เมื่อ $N_{VOC, average}$ = ฟลักซ์การระเหยของ VOC เฉลี่ย ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

K_{OL} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว (m s^{-1})

C_{lm} = ความเข้มข้นของ VOC เฉลี่ยแบบล็อกในวัฏภาคของเหลว (mg L^{-1})

$C_{L,f}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวตอนสุดท้ายของกระบวนการระเหย (mg L^{-1})

$C_{L,o}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวตอนต้นเริ่มต้นของกระบวนการระเหย (mg L^{-1})

จากทฤษฎีสองฟิล์มจะเห็นได้ว่าค่า $N_{VOC, average}$ แปรผันโดยตรงกับค่า K_{OL} และ C_{lm}
การคำนวณความเข้มข้นค่า C_{lm}

$$C_{lm} = \frac{904.62 - 1106.60}{\ln \frac{904.62}{1106.60}}$$

$$= 1002.22 \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{จะได้ } N_{VOC, average} = (2.16 \times 10^{-6})(1002.22) = 1.17 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

3.2 วิธีการทดลอง โดยการทำสมดุลมวลรอบถังระเหยจะได้ว่า

$$N_{VOC, average} = \frac{C_{L,f} - C_{L,o}}{\frac{A}{V} t_f} = h \left(\frac{C_{L,f} - C_{L,o}}{t_f} \right)$$

$$= \frac{(0.0769)(280.77 - 923.64)}{43200}$$

$$= 1.14 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

จากการคำนวณทั้งสองวิธีจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวปรียาภรณ์ ทองสร้อย
วัน เดือน ปี เกิด 8 พฤษภาคม 2518
วุฒิการศึกษา
วุฒิ ชื่อสถาบัน ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล 2541