

รายงานการวิจัย

เรื่อง

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับกระบวนการระเหยของสาร
อินทรีย์ระเหยง่ายจากบ่อเติมอากาศ
Mass Transfer Coefficient for Volatilization of Volatile Organic
Compound from Aeration Basin

เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2544
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม. สงขลานครินทร์

ผู้วิจัย

นาย จรัญ บุญกาญจน์

หัวหน้าโครงการ

310

เลขหมู่	28849X
Bib Key	

บทคัดย่อ

ถึงแม้ว่าการเติมอากาศจะเป็นวิธีการที่สำคัญสำหรับการถ่ายโอนออกซิเจนสู่น้ำเสียที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป แต่การเติมอากาศก็จะส่งเสริมให้มีการถ่ายโอนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) จากน้ำเสียสู่บรรยากาศได้ ซึ่งนอกจากจะเป็นอันตรายต่อ คน พืช และสัตว์โดยตรงแล้ว ยังทำให้ระดับของโอโซนในบรรยากาศสูงขึ้นได้ด้วย การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยการดำเนินการในเติมอากาศ ได้แก่ความเร็วรอบในการกวน (ในเทอมของ Reynolds number, Re) และอุณหภูมิของแหล่งน้ำ (T) ต่อการถ่ายโอนของ VOCs จากถังกวนเติมอากาศจำลอง การถ่ายโอนของ VOCs ถูกวัดในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ($K_{O,a}$) สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_{g,a}$) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($k_{l,a}$) สมการเอมพิริคัลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{l,a}$ และ $k_{g,a}$ กับ Re และ T ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการทดลอง และจากการตรวจสอบสรุปได้ว่าสมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายการถ่ายโอนของ VOCs จากถังกวนเติมอากาศได้

จากการศึกษาแนวทางเพื่อลดการถ่ายโอนของ VOCs ในสภาวะที่มีการกวนเติมอากาศ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวพบว่า การเติม sodium dodecyl sulfate (SDS) ลงในน้ำให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 300 mg/L จะสามารถลดสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวได้ในช่วง 1.8 ถึง 3.0 เท่า และ ช่วง 1.30 ถึง 4.6 เท่า ตามลำดับ โดยขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการกวน ดังนั้นการเติม SDS ลงในน้ำจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดการถ่ายโอนของ VOCs ในขณะที่มีการกวนเติมอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Abstract

Although, aeration is an important mean for oxygen transfer utilized in many wastewater treatment facilities, it also enhances the transfer of volatile organic compounds (VOCs) from wastewater to atmosphere with a result of not only harmful to human, plant or animal but increasing ozone level in the atmosphere also. The aims of this research were to investigate the influence of aerator operating parameters including agitation speed (as Reynolds number, Re) and water temperature (T) on VOCs transfer from simulated aerated basin. The VOCs transfer were measured in term of overall mass transfer coefficient ($K_{oL}a$), gas film coefficient (k_ga) and liquid film coefficient (k_La). The correlations of k_ga and k_La with Re and T were determined from experimental data and expressed as empirical equations. The empirical equations of k_ga and k_La has been verified against experimental data and proved that they can be used to predict VOCs transfer rate from aeration tank.

The mean to reduce VOCs transfer rate from aeration basin by using a surfactant has also investigated. The results shown that adding sodium dodecyl sulfate (SDS) of 300 mg/L in water could reduce k_ga and k_La by factor of 1.8 to 3.0 and 1.3 to 4.6, respectively, depending on agitation speed. Thus, adding SDS in aeration basin is an efficient way to reduce VOCs transfer during aeration process.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
รายการตาราง	VI
รายการรูป	VII
บทที่ 1 บทนำและทฤษฎี	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 อัตราการระเหยและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	2
1.3 ตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds number)	5
บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	6
2.1 สารเคมี	6
2.2 อุปกรณ์	6
2.3 วิธีการทดลอง	7
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์	11
3.1 ผลของความเร็วยุบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิถีภาคของเหลว	11
3.2 ผลของความเร็วยุบต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว	13
3.3 ผลของความเร็วยุบต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส	13
3.4 ผลของอุณหภูมิของแหล่งน้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	15
3.4.1 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ $K_{oL}a$	16
3.4.2 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ k_La	17
3.4.3 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ k_Ga	17
3.5 สมการเอ็มพิริคัลของ k_La และ k_Ga	19
3.5.1 กรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำที่ไม่มีการกวน	19
3.5.2 กรณีที่มีการกวนและไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำ	20
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการ k_La และ k_Ga โดยการเปรียบเทียบ $K_{oL}a$ ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลของ k_La และ k_Ga กับผลการทดลอง	21
3.6.1 กรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำที่ไม่มีการกวน	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.2 กรณีที่มีการกวนและไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำ	24
3.7 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	28
3.7.1 ผลของปริมาณของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ที่ความเร็วรอบคงที่	28
3.7.1.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$	28
3.7.1.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_G a$	31
3.7.2 ผลของความเร็วรอบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในสภาวะที่มี การเติมสารลดแรงตึงผิว	33
3.7.2.1 ผลของความเร็วรอบต่อ $k_L a$ ภายใต้สภาวะที่เติมสารลดแรงตึงผิว	33
3.7.2.2 ผลของความเร็วรอบต่อ $k_L a$ ภายใต้สภาวะที่เติมสารลดแรงตึงผิว	34
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	38

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. แสดงค่าการคำนวณ k_{Ga} และ k_{La} ของ VOCs ที่อุณหภูมิต่างๆ	21
2. แสดงค่าการคำนวณ k_{Ga} และ k_{La} ของ VOCs	24
3. ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	30
4. ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	32
ก.1 K_{OLa} และ k_{Ga} ของเมทานอลที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C	38
ก.2 K_{OLa} และ k_{Ga} ของทูโลอินที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C	38
ก.3 K_{OLa} และ k_{Ga} ของเมทานอลที่อุณหภูมิของน้ำต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm	38
ก.4 K_{OLa} และ k_{La} ของทูโลอินที่อุณหภูมิของน้ำต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm	39
ก.5 K_{OLa} ของอะซีโตนที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C และ 40°C	39
ก.6 K_{OLa} ของ MEK ที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C	39
ก.7 K_{OLa} ของเบนซีนที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C และ 40°C	40
ก.8 K_{OLa} ของ อะซีโตน MEK และ เบนซีนที่อุณหภูมิของน้ำต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm	40
ก.9 K_{OLa} และ k_{Ga} ของเมทานอลที่ความเข้มข้นของ SDS ต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 100 rpm	40
ก.10 K_{OLa} และ k_{Ga} ของเมทานอลที่ความเร็วรอบต่างๆความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 300 mg/L	41
ก.11 K_{OLa} และ k_{La} ของทูโลอินที่ความเข้มข้นของ SDS ต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 100 rpm	41
ก.12 K_{OLa} และ k_{La} ของทูโลอินที่ความเร็วรอบต่างๆความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 300 mg/L	41
ข.1 ค่าคงที่ของเฮนรีของ VOCs ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ	42
ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในฟิล์มแก๊สของ VOCs ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ	42
ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในฟิล์มของเหลวของ VOCs ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ	43
ข.4 น้ำหนักโมเลกุลของ VOCs ที่สนใจ	43

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1. แสดงไดอะแกรมของถังกวนจำลอง	7
2. ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{O_2a} กับ Re สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำถึงปานกลาง อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ $27\text{ }^{\circ}\text{C}$	11
3. ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{O_2a} กับ Re สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูง อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ $27\text{ }^{\circ}\text{C}$	12
4. ความสัมพันธ์ระหว่าง k_La (toluene) กับ Re ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K	14
5. ความสัมพันธ์ระหว่าง k_Ga (methanol) กับ Re ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K	15
6. ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{O_2a} ของ VOCs กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง $300.15\text{ K} - 331.15\text{ K}$ ที่ความเร็วรอบ 0 rpm	16
7. ความสัมพันธ์ระหว่าง k_La (toluene) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง $300.15\text{ K} - 331.15\text{ K}$ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm	18
8. ความสัมพันธ์ระหว่าง k_Ga (methanol) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง $300.15\text{ K} - 331.15\text{ K}$ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm	19
9. การเปรียบเทียบค่า K_{O_2a} ของอะซีโตน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัลสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำและไม่มีการกวน (อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ อยู่ในช่วง $300.15\text{--}327.15\text{ K}$)	22
10. การเปรียบเทียบค่า K_{O_2a} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัลสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำและไม่มีการกวน (อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ อยู่ในช่วง $300.15\text{--}327.15\text{ K}$)	22
11. การเปรียบเทียบค่า K_{O_2a} ของเบนซีน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัลสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำและไม่มีการกวน (อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ อยู่ในช่วง $300.15\text{--}327.15\text{ K}$)	23
12. การเปรียบเทียบค่า K_{O_2a} ของอะซีโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง $0\text{--}470\text{ rpm}$ และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K	25

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
13. การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K	26
14. การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของเบนซีน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K	26
15. การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของอะซีโตน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 315.15 K	27
16. การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของเบนซีน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 315.15 K	27
17. แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว R_L ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	29
18. ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	30
19. แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส R_G ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	32
20. ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	32
21. เปรียบเทียบ k_La ของโพลีเอทิลีน สำหรับกรณีที่มีและไม่เติม SDS ในน้ำ	34
22. เปรียบเทียบ k_Ga ของเมทานอล สำหรับกรณีที่มีและไม่เติม SDS ในน้ำ	35

บทที่ 1

1.1 บทนำ

บ่อเติมอากาศ (aeration basin) เป็นหน่วยหลักสำหรับการถ่ายโอนมวลในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม มีหน้าที่เพื่อถ่ายโอนออกซิเจนจากวัฏภาคแก๊ส (อากาศ) สู่วัฏภาคของเหลว (น้ำเสีย) การเติมอากาศอาจทำได้โดยการกวนผิวน้ำอย่างรุนแรงเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ (surface aeration) หรือการใช้วิธีการพ่นอากาศสู่แหล่งน้ำโดยตรง (air jet) ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะทำให้เกิดความปั่นป่วนในแหล่งน้ำในแนวลึกและครอบคลุมบริเวณกว้าง ส่งผลให้การถ่ายโอนของออกซิเจนสู่แหล่งน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามสภาพของความปั่นป่วนที่เกิดจากการเติมอากาศด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้มีการถ่ายโอนมวลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียสู่อากาศได้ดี บ่อเติมอากาศจึงจัดเป็นแหล่งที่มีการปล่อย VOCs สูบรรยากาศที่สำคัญแหล่งหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบ่อเติมอากาศมักจะให้ความสำคัญกับการถ่ายโอนของออกซิเจนเป็นหลัก แม้ว่าจะมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการหาอัตราการระเหยของ VOCs ที่ระเหยจากบ่อเติมอากาศ แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับหาอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศที่มีรายงานไว้นั้นถูกพัฒนามาบนพื้นฐานของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจน แต่เนื่องจากการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนจากแหล่งน้ำเป็นกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว ดังนั้นการคำนวณหาอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศโดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนพื้นฐานของออกซิเจนอาจจะเหมาะสมสำหรับ VOCs ที่กระบวนการการระเหยจากแหล่งน้ำถูกควบคุมโดยฟิล์มของเหลวเท่านั้น การนำสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนพื้นฐานของออกซิเจนมาประยุกต์ใช้กับ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการระเหยส่วนใหญ่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส หรือนำมาประยุกต์ใช้กับ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการระเหยอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ จะทำให้การประมาณปริมาณการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศผิดพลาดได้ การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs จากบ่อเติมอากาศที่สามารถประยุกต์ใช้กับ VOCs ทุกประเภทได้ดี เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้การทำนายการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศมีความถูกต้องกว่าการทำนายโดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนพื้นฐานของออกซิเจน

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาผลของความเร็วรอบของชุดกวนในบ่อเติมอากาศต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊ส (สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส) และในวัฏภาคของเหลว (สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาผลของความเร็วรอบของชุดกวนในบ่อเติมอากาศต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊ส (สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส) และในวัฏภาคของเหลว (สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว)
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำในบ่อเติมอากาศต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊ส (สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส) และในวัฏภาคของเหลว (สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว)
3. พัฒนาศมการเอ็มพิริคัล (empirical) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องเช่นความเร็วรอบของการกวนและอุณหภูมิของน้ำ
4. ศึกษาแนวทางการลดอัตราการระเหยของ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากบ่อกวนเติมอากาศโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

1.2 อัตราการระเหยและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

อัตราการระเหยของ VOCs (N_{VOCs}) จากบ่อเติมอากาศสามารถหาค่าได้โดยใช้แนวคิดของทฤษฎีสองฟิล์ม ในทำนองเดียวกันกับการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดที่มีรายงานไว้ทั่วไป โดยที่อัตราการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำจะเท่ากับผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient, K_{ol}) กับความแตกต่างของความเข้มข้นของ VOCs ระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคแก๊ส (concentration difference, ΔC) และพื้นที่ของการถ่ายโอนมวล (area, a) แต่เนื่องจากพื้นที่ของการถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคของเหลวสู่วัฏภาคแก๊สของบ่อกวนเติมอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระดับความปั่นป่วนของวัฏภาคของเหลวที่เกิดจากการกวนผสมอย่างรุนแรง ดังนั้นเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ใช้สำหรับบ่อเติมอากาศจึงนิยมแสดงในเทอมของผลคูณระหว่าง K_{ol} กับ a คือ $K_{ol} a$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (volumetric mass transfer coefficient) แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในเชิงของความเร็ว (transfer velocity) ที่ใช้ทั่วไปสำหรับระบบเปิดที่ทราบค่าพื้นที่ของการถ่ายโอนมวล สมการที่สำคัญที่อธิบายกระบวนการการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนเติมอากาศบนพื้นฐานของทฤษฎีสองฟิล์มสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$R_{VOCs} = K_{ol} a (\Delta C) \quad (1.1)$$

เมื่อ R_{VOCs} คืออัตราการระเหยของ VOCs (mol s^{-1}) ΔC คือความแตกต่างของความเข้มข้นของ VOCs (mol m^{-3}) และ $K_{ol} a$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) จากสมการ (1.1) สำหรับกระบวนการการระเหยของ VOCs จากวัฏภาคของเหลวในบ่อกวนเติมอากาศสู่วัฏภาคแก๊สนั้น

$$\Delta C = C_w - \frac{C_g H}{RT} \quad (1.2)$$

เมื่อ C_w คือความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว (mol m^{-3}) C_g คือความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคแก๊ส (mol m^{-3}) หรือในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ H คือค่าคงที่ของ เฮนรี่ ($\text{atm m}^3 \text{mol}^{-1}$) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ($\text{atm}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) โดยปกติแล้วเทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ (1.2) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมแรก ดังนั้น สมการ (1.2) ลดรูปเป็น

$$\Delta C \approx C_w \quad (1.3)$$

และอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนเติมอากาศที่มีปริมาตรคงที่คือ

$$R_{\text{VOCs}} = -V \frac{dC_L}{dt} \quad (1.4)$$

รวมการ (1.1), (1.3) และ (1.4) เข้าด้วยกัน จะได้

$$-V \frac{dC_L}{dt} = K_{OL} a C_L \quad (1.5)$$

อินทิเกรต สมการ (1.5) โดยที่ $C_L = C_{L0}$ เมื่อ $t = 0$ และ $C_L = C_L$ เมื่อ $t = t$ ใดๆ จะได้

$$\ln \frac{C_L}{C_{L0}} = -\frac{K_{OL} a}{V} t \quad (1.6)$$

ดังนั้น

$$-\frac{K_{OL} a}{V} = S \quad (1.7)$$

เมื่อ S คือความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \frac{C_L}{C_{L0}}$ กับ t จากสมการ (1.7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$K_{OL} a = -SV \quad (1.8)$$

ดังนั้นจากข้อมูลของความเข้มข้นของ VOCs ในบรรยากาศของเหลว C_L ที่เวลาต่างๆ t และปริมาตรของของเหลวในบ่อกวนเติมอากาศ สามารถหาค่า $K_{O_2}a$ ได้ตามสมการ (1.6)-(1.8) และโดยทฤษฎีสองฟิล์ม $K_{O_2}a$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{K_{O_2}a} = \frac{1}{k_La} + \frac{RT}{Hk_Ga} \quad (1.9)$$

เมื่อ k_Ga คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($m^3 s^{-1}$) k_La คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($m^3 s^{-1}$) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ซึ่งมีค่าเป็น $8.21 \times 10^{-5} \text{ atm } m^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์มีหน่วยเป็น K และ H คือค่าคงที่ของเฮนรี มีหน่วยเป็น $\text{atm } m^3 \text{ mol}^{-1}$ สมการที่ (1.9) สามารถเขียนในเทอมของความต้านทานการถ่ายโอนมวลดังแสดงในสมการ (1.10)

$$R_{O_2} = R_L + R_G \quad (1.10)$$

โดยที่ $R_{O_2} (= \frac{1}{K_{O_2}a})$ คือความต้านทานรวมในขณะที่ $R_L (= \frac{1}{k_La})$ และ $R_G (= \frac{RT}{Hk_Ga})$ คือความต้านทานของวัฏภาคของเหลวและของวัฏภาคแก๊ส ตามลำดับ โดยการแทนค่า k_Ga และ k_La ในสมการ (1.9) และ (1.10) พบว่าสำหรับ VOCs ที่มีค่า H สูง (คือ VOCs ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ) R_L จะสูงกว่า R_G มากๆ กระบวนการระเหยของ VOCs ประเภทนี้จะถูกควบคุมโดยความต้านทานในวัฏภาคของเหลว สมการ (1.9) ลดรูปเป็น

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_{O_2}a} &= \frac{1}{k_La} && \text{หรือ} \\ k_La &= K_{O_2}a \end{aligned} \quad (1.11)$$

และสำหรับ VOCs ที่มีค่า H ต่ำ (คือ VOCs ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง) R_G จะสูงกว่า R_L มากๆ กระบวนการระเหยของ VOCs ประเภทนี้จะถูกควบคุมโดยความต้านทานในวัฏภาคแก๊ส สมการที่ (1.9) ลดรูปเป็น

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_{O_2}a} &= \frac{RT}{Hk_Ga} && \text{หรือ} \\ k_Ga &= \frac{RTK_{O_2}a}{H} \end{aligned} \quad (1.12)$$

ดังนั้นโดยการทดลองวัดค่า K_{oa} ของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยความต้านทานในวัฏภาคของเหลว และโดยการทดลองวัดค่า K_{oa} ของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยความต้านทานในวัฏภาคแก๊ส จะสามารถหาค่า $k_L a$ และค่า $k_G a$ ได้ ตามสมการ (1.11) และสมการ (1.12) ตามลำดับ

1.3 ตัวเลขเรโนลด์ (Reynold Number)

ในการกวนของเหลวสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติของของเหลว ขนาดของใบกวน และความเร็วรอบที่ใช้ในการกวนในเทอมของตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่าตัวเลขเรโนลด์ (Reynold Number, Re , dimensionless) ได้ดังสมการ (1.13)

$$Re = \frac{ND^2}{\nu} \quad (1.13)$$

เมื่อ N คือความเร็วรอบ (s^{-1}) D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (m) และ ν คือความหนืดของของเหลว ($m^2 s^{-1}$) โดยในการศึกษานี้จะแสดงความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองในเทอมของ Re

1.4 VOC กับ มลภาวะทางอากาศ

การปล่อยสาร VOCs จากกระบวนการต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมและจากระบบบำบัดของเสียของโรงงานสู่อากาศ ทำให้มีผลต่อสุขภาพของคน สัตว์ และพืชโดยตรงโดยระดับของความร้ายแรงจะขึ้นอยู่กับชนิดของและเวลาที่สัมผัสกับ VOCs นั้นๆ ค่ามาตรฐานของความเข้มข้นของ VOCs ในอากาศที่ปลอดภัยจึงแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของ VOCs ซึ่งสามารถดูได้จากค่ามาตรฐานสารเคมีในอากาศและดัชนีชี้วัดทางชีวภาพซึ่งมีอยู่หลายมาตรฐานแต่ที่ยอมรับกันแพร่หลายได้แก่มาตรฐานของ ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygiene) NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) OSHA (Occupational Safety and Health Administration) และมาตรฐานของกระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคมของประเทศไทย เป็นต้น

การปล่อย VOCs สู่อากาศนอกจากจะมีผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตโดยตรงแล้วยังมีผลทำให้ปริมาณโอโซน (ozone, O_3) ในบรรยากาศสูงขึ้น โดยโอโซนที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลของ VOCs กับไนโตรเจนออกไซด์ ความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศที่สูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนเช่นกันโดยจะทำให้เจ็บทรวงอก (chest pain) และหายใจลำบาก ค่ามาตรฐานของความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศเฉลี่ยในเวลา 1 ชั่วโมงที่กำหนดและให้อยู่ในสหรัฐอเมริกาคือ $235 \mu g/m^3$ แนวทางหนึ่งที่สหรัฐอเมริกาใช้เพื่อควบคุมความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศคือควบคุมปริมาณของ VOCs ที่ปล่อยสู่อากาศ

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

- 2.1.1 เมทานอล (Methanol)
- 2.1.2 โทลูอีน (Toluene)
- 2.1.3 เบนซีน (Benzene)
- 2.1.4 เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)
- 2.1.5 อะซีโตน (Acetone)
- 2.1.6 ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol)
- 2.1.7 โซเดียม โดเดซิล ซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate, SDS)

2.2 อุปกรณ์

2.2.1 ถังกวนเติมอากาศจำลอง

ถังกวนจำลองมีปริมาตร 70 ลิตร อัตราส่วนต่างๆที่ใช้ในการสร้างถังกวนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนมาตรฐานตามหลักการการออกแบบถังกวนโดยทั่วไป และสามารถขยาย (scale up) ให้มีขนาดใหญ่ได้ตามหลักการของการขยายขนาด ขนาดต่างๆของถังกวนจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของถังกวน (T) เท่ากับ 45 cm ภายในถังมี baffle จำนวน 4 อัน โดยความกว้างของ baffle (B) เท่ากับ $T/12$ ใบกวนที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ six flat blade มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (D) เท่ากับ $T/3$ ใบกวนถูกขับด้วยมอเตอร์ขนาด 1 hp ซึ่งควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ ความสูงของของเหลวในถัง (Z) กำหนดให้เท่ากับ T ($Z/T=1$) ตำแหน่งของใบกวนในถัง (C) อยู่ที่ระยะ $(1/3)Z$ ขนาดต่างๆของถังกวนที่กำหนดเป็นมาตรฐานจะเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบผลการศึกษากับนักวิจัยอื่นและหรือกับบ่อเติมอากาศจริงได้ โคอะแกมของถังกวนจำลองที่ใช้ในการศึกษาแสดง ดังรูปที่ 1

2.2.2 แก๊สโครมาโทกราฟี (Hewlett Packard, model 5790 A)

ประกอบด้วยเครื่องตรวจหา (detector) เป็นชนิด FID และแพ็คคอลัมน์ยาว 6 ft บรรจุด้วย OV-101

2.2.3 พาราฟิล์ม

2.2.4 เครื่องชั่งละเอียด

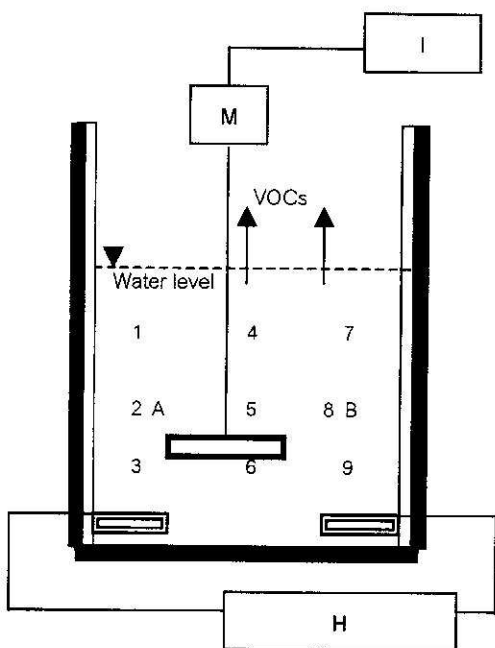
2.2.5 เทอร์โมมิเตอร์

2.2.6 ไมโครปิเปต

2.2.7 เครื่องวัดความเร็วรอบ

2.2.8 ตู้อบ

2.2.9 เครื่องแก้ว



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของถังกวนจำลอง

1-9 คือตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ A และ B คือตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างน้ำ M คือมอเดอร์ I คือ ระบบควบคุมความเร็วรอบ และ H คือ ระบบให้ความร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ

2.3. วิธีการทดลอง

2.3.1 การเตรียมสารละลาย

1. นำสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ต้องการศึกษามาละลายน้ำให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการ ซึ่งน้ำที่ใช้ผ่านการกรองด้วย activated carbon 0.3 ไมครอน ปริมาตร 50 ลิตร และกวนผสมจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน

2. บ่มสารละลายเข้าสู่ถังกวน

2.3.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง

1. ในระหว่างการทดลองจะเก็บตัวอย่างสารละลายจากถังกวนจำนวน 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งจุดกึ่งกลางตามความลึกของสารละลายดังแสดงด้วย A และ B ดังแสดงในรูปที่ 1

2. นำตัวอย่างที่ได้บรรจุในขวดเก็บตัวอย่าง

3. ปิดด้วยพาราฟิล์ม และปิดฝาขวดให้สนิท
4. นำตัวอย่างที่ได้เก็บในตู้เย็น
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของ VOCs โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี

2.3.3 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตัวอย่าง

2.3.3.1 การเตรียม Calibration curve ของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

1. เจือจางสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการ

2. นำสารละลายเจือจางของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายตามข้อ 1. ปริมาตร 5 ml. ผสม

กับสารอ้างอิงมาตรฐาน (internal standard) คือ Isopropanol 500 mg L^{-1} ในน้ำปริมาตร 5 ml. ในขวดเก็บตัวอย่าง และเขย่าให้เข้ากัน

3. นำสารละลายผสมตามข้อ 2. ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับอัตราส่วนของพื้นที่พีคของสารที่ต้องการต่อพื้นที่พีคของสารอ้างอิงมาตรฐาน

2.3.3.2 การหาความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างที่เก็บที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 5 ml. มาผสมกับสารอ้างอิงมาตรฐาน ปริมาตร 5 ml. เขย่าให้เข้ากัน

2. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ที่สภาวะเดียวกันกับการเตรียม calibration curve

3. คำนวณอัตราส่วนของพื้นที่พีคของสารที่ต้องการต่อพื้นที่พีคของสารอ้างอิงมาตรฐาน และนำไปหาความเข้มข้นของสารนั้นโดยการเทียบกับ calibration curve

2.3.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วยกต่อค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (liquid film coefficient, $k_{L,a}$) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (gas film coefficient, $k_{G,a}$)

2.3.4.1 ผลของความเร็วยกต่อ $k_{L,a}$

1. เตรียมสารละลายโทลูอีนให้มีความเข้มข้นประมาณ 250 mg L^{-1}

2. บั้มสารละลายนี้เข้าสู่ถังกวน ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($\sim 27^\circ\text{C}$) และควบคุมให้

ความเร็วยกของการกวนเท่ากับ 0 rpm

3. เก็บตัวอย่างของสารละลายตอนเริ่มต้นการทดลองและที่เวลาต่างๆ

4. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโทลูอีนที่เวลาต่างๆ เพื่อหา $k_{L,a}$ ตามสมการ (1.11)

5. ทำการทดลองซ้ำดังที่อธิบายข้างต้น แต่เปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 20, 60, 100, 260

และ 470 rpm

2.3.4.2 ผลของความเร็วรอบต่อ $k_L a$

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อ $k_L a$ แต่ใช้เมทานอล และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 1000 mg L^{-1} แทนการใช้โกลูอิน และหาค่า $k_L a$ จากสมการ (1.12)

2.3.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของของเหลวต่อค่า $k_L a$ และ $k_G a$

2.3.5.1 ผลของอุณหภูมิจนของน้ำต่อ $k_L a$

1. เตรียมสารละลายโกลูอินให้มีความเข้มข้นประมาณ 250 mg L^{-1}

2. บั่มสารละลายนี้เข้าสู่ถังกวน ควบคุมให้ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 0 rpm และควบคุม

อุณหภูมิจนของภาควัสดุของเหลวเท่ากับอุณหภูมิจนของห้อง ($\sim 27^\circ\text{C}$)

3. เก็บตัวอย่างของสารละลายตอนเริ่มต้นการทดลองและที่เวลาต่างๆ

4. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโกลูอินที่เวลาต่างๆ เพื่อหาค่า $k_L a$

5. ทำการทดลองซ้ำดังที่อธิบายข้างต้น แต่เปลี่ยนอุณหภูมิจนของน้ำเป็น 42, 48, 54 และ 58°C

2.3.5.2 ผลของอุณหภูมิจนของน้ำต่อ $k_G a$

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาผลของอุณหภูมิจนของน้ำต่อ $k_L a$ แต่ใช้เมทานอล และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1000 mg L^{-1} แทนการใช้โกลูอิน และหาค่า $k_G a$ จากสมการ (1.12)

2.3.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$ และ $k_G a$

2.3.6.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$

1. เตรียมสารละลายโกลูอินให้มีความเข้มข้น 250 mg L^{-1} และเติมสารลดแรงตึงผิว (sodium dodecyl sulfate, SDS) ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg L^{-1}

2. บั่มสารละลายนี้เข้าสู่ถังกวน

3. ควบคุมความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 100 rpm และควบคุมอุณหภูมิจนของห้องที่อุณหภูมิจนของ

4. เก็บตัวอย่างของสารละลายตอนเริ่มต้นและที่เวลาต่างๆ

5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโกลูอินที่เวลาต่างๆ

6. ทำการทดลองซ้ำดังที่อธิบายข้างต้น แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(sodium dodecyl sulfate, SDS) เป็น 0, 200, 300 และ 400 mg L⁻¹ ตามลำดับ

7. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1-5 โดยใช้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 300 mg L⁻¹ และเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 0, 20, 100 และ 260 rpm ตามลำดับ

2.3.6.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ k_{Ga}

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ k_{La} แต่ใช้เมทานอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1000 mg L⁻¹ แทนการใช้โทลูอีน

2.3.7 พัฒนาสมการเอมพิริคัลของ k_{La} และ k_{Ga}

2.3.7.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} และ k_{Ga} กับความเร็วรอบในช่วงที่ศึกษา

2.3.7.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} และ k_{Ga} กับอุณหภูมิของน้ำในช่วงที่ศึกษา

2.3.7.3 เสนอสมการเอมพิริคัลของ k_{La} และ k_{Ga} สำหรับกรณีต่างๆประกอบด้วย

2.3.7.3.1 กรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิของน้ำที่ไม่มีการกวน

2.3.7.3.2 กรณีที่มีการกวนและไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำ

ปรับความสัมพันธ์ที่ได้ให้สามารถใช้สำหรับ VOCs ทั่วไปโดยใช้โทลูอีนและเมทานอลเป็นสารอ้างอิงสำหรับสมการเอมพิริคัลของ k_{La} และ k_{Ga} ตามลำดับ

2.3.8 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอมพิริคัลที่พัฒนาขึ้น

โดยการใช้สมการเอมพิริคัลของ k_{La} และ k_{Ga} ที่พัฒนาขึ้น ทำนายค่า $K_{O_{La}}$ ของ VOCs 3 ชนิด คือ อะซีโตน MEK และเบนซีน ร่วมกับทฤษฎีสองฟิล์ม และเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่วัดได้โดยตรงจากการทดลอง ในกรณีต่างๆประกอบด้วย

2.3.8.1 กรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำที่ไม่มีการกวน

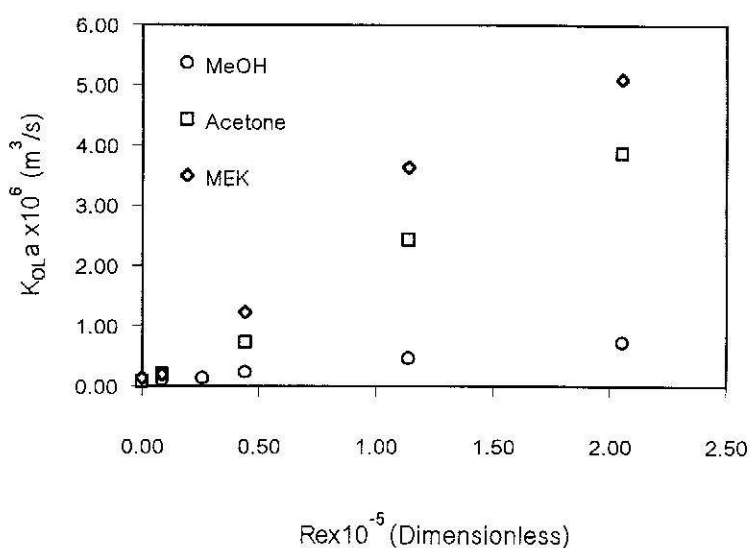
2.3.8.2 กรณีที่มีการกวนและไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำ

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

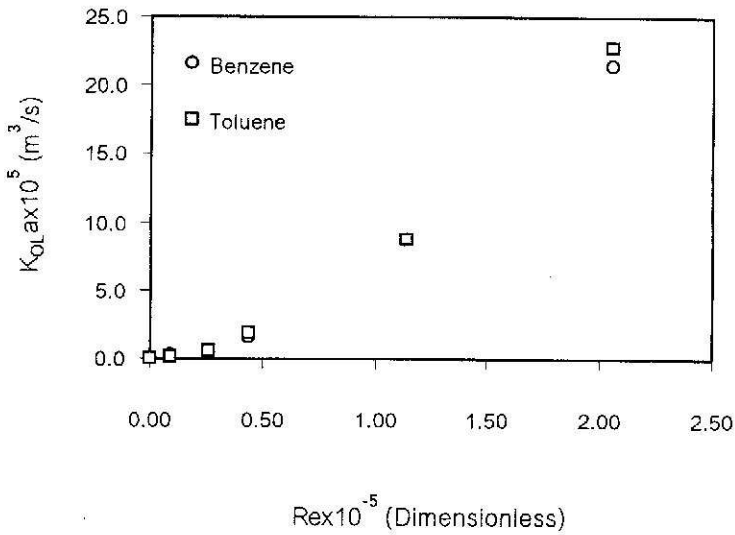
3.1 ผลของความเร็วยุโรปต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิฤภาคของเหลว (overall mass transfer coefficient, K_{OLa})

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร (K_{OLa}) สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำ หาได้จากข้อมูลของความเข้มข้นของ VOCs ที่เวลาต่างๆ ตามสมการ (1.6) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับความเร็วยุโรปในเทอมของ Reynold number (Re) แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำถึงปานกลางและสำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับ Re สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำถึงปานกลาง อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ $27^{\circ}C$

จากรูปที่ 2 พบว่าค่า K_{OLa} ของเมทานอลค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อความเร็วยุโรปมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการระเหยของเมทานอลควบคุมโดยฟิล์มในวิฤภาคแก๊ส ดังนั้นที่ความเร็วยุโรปต่ำๆ จะไม่มีความปั่นป่วนในวิฤภาคแก๊ส และไม่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวของการระเหย ซึ่งสังเกตได้จากพื้นที่ผิวของการระเหยค่อนข้างราบเรียบ แต่เมื่อความเร็วยุโรปสูงขึ้นจะทำให้เกิดความปั่นป่วนในวิฤภาคของเหลว ซึ่งนอกจากจะเพิ่มพื้นที่ผิวของการระเหยแล้วความปั่นป่วนในวิฤภาคของเหลวยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มแก๊สที่อยู่ติดกับชั้นฟิล์มของเหลวได้ ทำให้ K_{OLa} ของเมทานอลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับ Re สำหรับ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C

จากรูปที่ 3 พบว่า K_{OLa} ของโทลูอีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เนื่องจากการระเหยของโทลูอีนควบคุมโดยฟิล์มในชั้นของเหลว ดังนั้นอัตราการระเหยจึงขึ้นอยู่กับระดับความปั่นป่วนในวัฏภาคของของเหลวเป็นหลัก การกวนของเหลวนอกจากจะลดความหนาของฟิล์มของเหลวโดยตรงแล้วยังเพิ่มพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนมวลด้วย ส่งผลให้ K_{OLa} ของโทลูอีนสูงขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน

ผลการเปลี่ยนแปลงดังที่กล่าวมาสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ คือ ที่ความเร็วรอบน้อยกว่า 100 rpm ($Re < 4 \times 10^4$) ผิวหน้ามีลักษณะค่อนข้างเรียบ แต่ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 rpm หรือมากกว่า ($Re \geq 4 \times 10^4$) จะเริ่มสังเกตเห็นการกระจายของน้ำเกิดขึ้นในถังกวน ดังนั้นที่ความเร็วรอบมากกว่าหรือเท่ากับ 100 rpm นี้จะสังเกตเห็นการเพิ่มของ K_{OLa} ของทั้งเมทานอลและโทลูอีนอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบน้อยกว่า 100 rpm

สำหรับ VOC ที่มีความต้านทานต่อการระเหยอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับ Re ของ VOCs ในกลุ่มนี้ มีลักษณะอยู่ระหว่างลักษณะของโทลูอีนและลักษณะของเมทานอล ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการระเหยในแต่ละวัฏภาค อย่างเช่น อะซีโตนมีเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลวน้อยกว่า 20 % มีผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับ Re ของอะซีโตนมีลักษณะคล้ายกับของเมทานอล (รูปที่ 2) ในขณะที่เบนซีนซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลวมากกว่า 80 % ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับ Re ของเบนซีนจึงมีลักษณะคล้ายกับของโทลูอีนดังแสดงในรูปที่ 3

3.2 ผลของความเร็วยรอบต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (liquid film coefficient, $k_L a$)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $k_L a$ ได้จากกระบวนการการระเหยของโทลูอีนจากน้ำดังแสดงในสมการ (1.11) ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ กับความเร็วยรอบในเทอมของ Reynold number แสดงได้ดังรูปที่ 4 จากรูปดังกล่าวพบว่า $k_L a$ แปรเปลี่ยนกับ Re ในลักษณะที่เป็น quadratic และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ ของโทลูอีนกับ Re ดังสมการ (3.1)

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

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

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

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

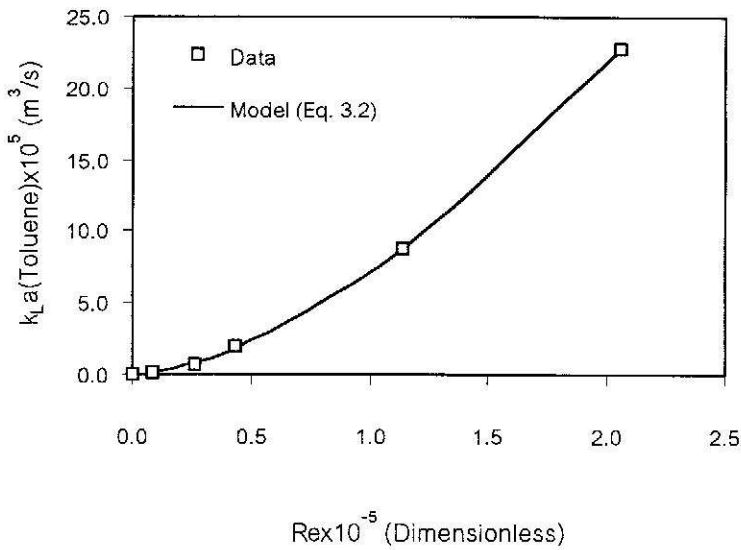
$$k_L a(\text{toluene}) = 5.62 \times 10^{-13} Re^{1.62} + 1.94 \times 10^{-7} \quad (3.2)$$

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

ค่า $k_L a$ ที่คำนวณได้โดยสมการ (3.2) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ในรูปที่ 4

3.3 ผลของความเร็วยรอบต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (gas film coefficient, $k_G a$)

เมทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และมีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สประมาณ 90 % ดังนั้นอัตราการระเหยของเมทานอลจึงถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส และสามารถหา $k_G a$ ของเมทานอลได้จาก $K_{O_L} a$ ของเมทานอลที่วัดได้จากการทดลองตามสมการ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} (toluene) กับ Re ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K

(1.12) ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} กับ Re แสดงดังรูปที่ 5 จากรูปดังกล่าวพบว่า k_{Ga} เพิ่มขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้น ในลักษณะที่ใกล้เคียงกับเชิงเส้น (linear) มาก และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} ของเมทานอลกับ Re ได้ดังสมการ (3.3)

$$k_{Ga}(\text{methanol}) = a Re^b + C \quad (3.3)$$

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

เมื่อ k_{Ga} คือ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$

a คือ ค่าคงที่, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$

b คือ ค่าคงที่ (ไม่มีหน่วย)

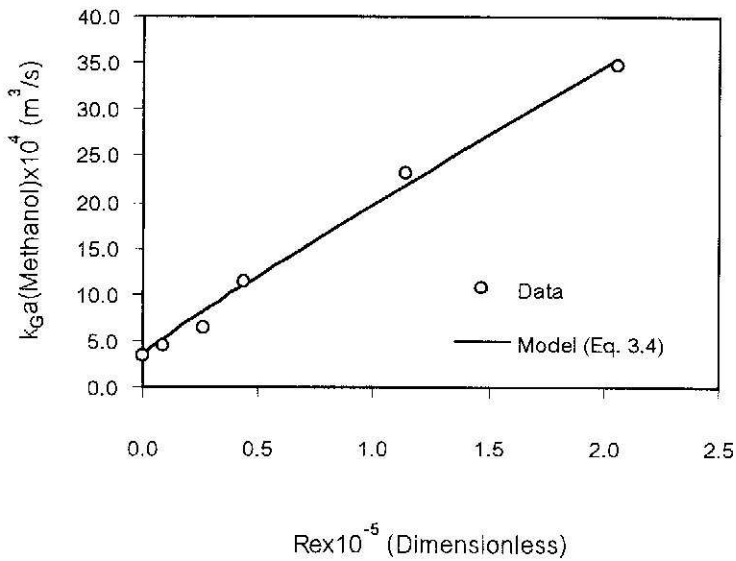
c คือ k_{Ga} ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm จากผลการทดลองได้ $c = 3.55 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

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

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

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

ค่า $k_G a$ ของเมทานอลที่คำนวณจากสมการ (3.4) แสดงเปรียบเทียบข้อมูลการทดลอง ดังแสดงด้วยเส้นทึบในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_G a$ (methanol) กับ Re ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K

3.4 ผลของอุณหภูมิของแหล่งน้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

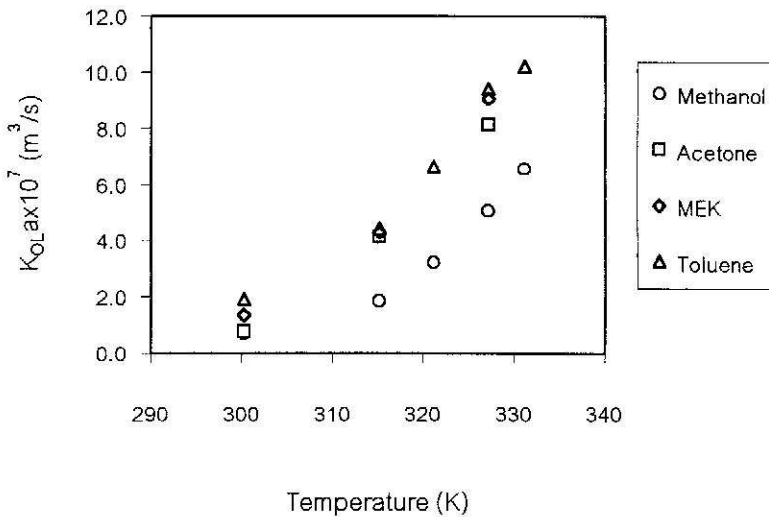
อุณหภูมิของน้ำภายในถังกวนถูกทำให้ร้อนโดยขดลวดความร้อนที่ติดตั้งอยู่บริเวณก้นของถังดังแสดงในรูปที่ 1 และควบคุมโดยสวิทช์เปิดปิดการทำงานของขดลวดความร้อน ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะดำเนินการในสภาวะที่ไม่มีการกวนน้ำ ลักษณะของอุณหภูมิภายในถังในกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเกรเดียนต์ตามความลึกของน้ำในช่วงประมาณ 6 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงสม่ำเสมอตลอดทั้งถัง ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิเฉลี่ยเป็นตัวแทนของ

อุณหภูมิจริงภายในถัง โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาของการทดลองที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถคำนวณได้จาก สมการ (3.5) และมีค่ามีค่าเป็น 300.15, 315.15, 321.15, 327.15 และ 331.15 K

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

3.4.1 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ K_{OLa}

K_{OLa} สำหรับการระเหยของ VOCs ที่อุณหภูมิของน้ำมีค่าต่างๆ สามารถหาค่าได้จากข้อมูลของความเข้มข้นกับเวลาตามสมการ (1.6)-(1.8) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} กับอุณหภูมิเฉลี่ยของ VOCs ทั้ง 4 ชนิด ที่ศึกษา แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าค่า K_{OLa} ของ VOC เหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่สูงขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า K_{OLa} (Toluene) > K_{OLa} (Benzene) > K_{OLa} (MEK) > K_{OLa} (Acetone) > K_{OLa} (Methanol)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OLa} ของ VOCs กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง 300.15 K – 331.15 K ที่ความเร็วรอบ 0 rpm

3.4.2 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ k_La

ทำการวัด k_La จากกระบวนการการระเหยของโทลูอีนจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการ (1.11) ความสัมพันธ์ระหว่าง k_La ของโทลูอีนกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง 300.15 – 331.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm แสดงดังรูปที่ 7 จากรูปดังกล่าวพบว่า k_La เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_La ของโทลูอีนที่อุณหภูมิใดๆ เทียบกับค่า k_La ของโทลูอีนที่อุณหภูมิที่ใช้เป็นจุดอ้างอิง (คือ 300.15 K) ได้ดังสมการ

$$k_La(\text{toluene}) = k_La(\text{at } 300.15\text{K}) \exp(T - 300.15)$$

และเนื่องจาก k_La ที่ 300.15 K เท่ากับ $1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ดังนั้น จะได้

$$k_La(\text{toluene}) = 1.94 \times 10^{-7} \exp(a(T - 300.15))$$

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

เมื่อ a คือค่าคงที่ (มีหน่วยเป็น K^{-1}) จากการวิเคราะห์ข้อมูล k_La (toluene) กับอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำ โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $a = 0.0556$ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_La (toluene) กับอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำคือ

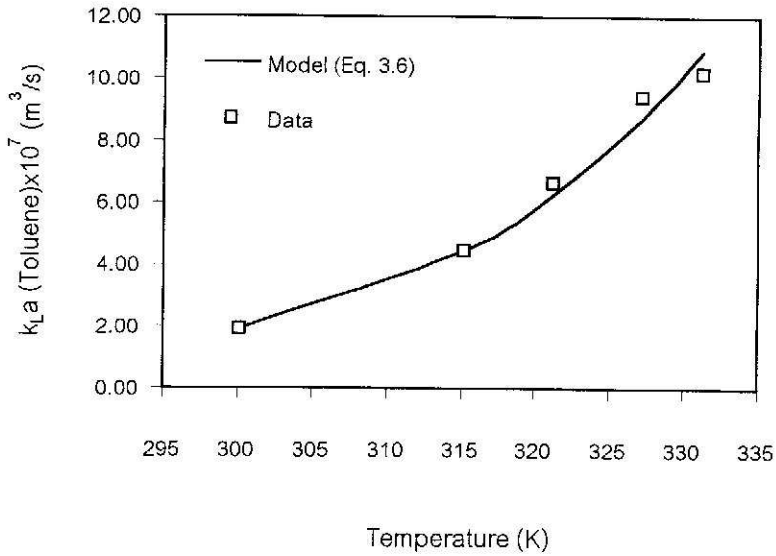
$$k_La(\text{toluene}) = 1.94 \times 10^{-7} \exp(0.0556(T - 300.15)) \quad (3.6)$$

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

ค่า k_La ของโทลูอีนที่คำนวณจากสมการ (3.6) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในรูปที่ 7

3.4.3 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำต่อ k_Ga

ทำการวัด k_Ga ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการการระเหยของเมทานอลจากแหล่งน้ำที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง 300.15 K- 331.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm โดยใช้สมการ (1.12) ความสัมพันธ์ระหว่าง k_Ga ของเมทานอลกับอุณหภูมิของน้ำในช่วงดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 8 จากรูปดังกล่าว พบว่า k_Ga



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} (toluene) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง 300.15 K- 331.15 K ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

เพิ่มกับอุณหภูมิของน้ำและความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} ของเมทานอลที่อุณหภูมิใดๆ กับค่า k_{Ga} ของเมทานอลที่อุณหภูมิ 300.15 K แสดงได้ดังสมการ

$$k_{Ga}(\text{methanol}) = k_{Ga}(\text{at } 300.15) \exp(a(T - 300.15))$$

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

$$k_{Ga}(\text{methanol}) = 3.55 \times 10^{-4} \exp(a(T - 300.15)) \quad (3.7)$$

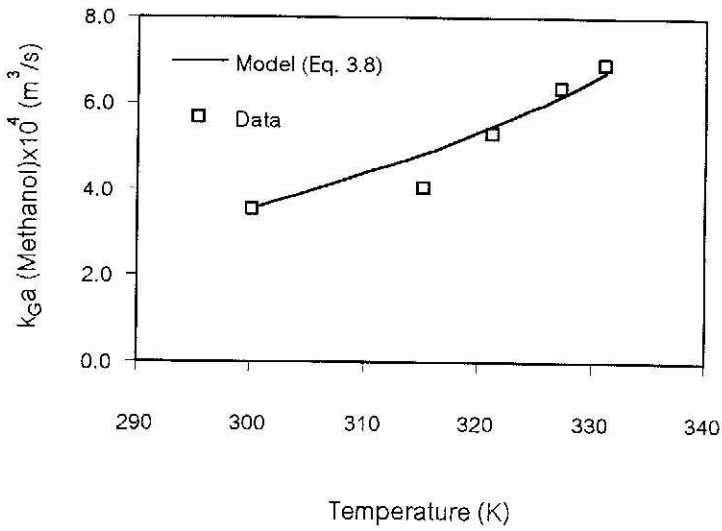
สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

a คือค่าคงที่ (มีหน่วยเป็น K^{-1}) จากการวิเคราะห์ข้อมูล k_{Ga} (methanol) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ โดยใช้ non linear regression จะได้ค่า $a = 0.0206$ ดังนั้นสมการเอ็มพีริคัลแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} (methanol) กับอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำคือ

$$k_{Ga}(\text{methanol}) = 3.55 \times 10^{-4} \exp(0.0206(T - 300.15)) \quad (3.8)$$

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

ค่าของ k_{Ga} (methanol) ที่คำนวณจากสมการ (3.8) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} (methanol) กับอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ในช่วง 300.15 K – 331.15 K ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

3.5 สมการเอมพิริคัลของ k_La และ k_{Ga}

3.5.1 กรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำที่ไม่มีการกวน

จากสมการเอมพิริคัลของ k_La และ k_{Ga} กับอุณหภูมิที่ได้จากการระเหยของโทลูอีนและเมทานอล จากน้ำภายใต้สภาวะที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ สามารถปรับเป็นสมการทั่วๆไป เพื่อให้ใช้กับ VOCs อื่นๆได้ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลของโทลูอีนและของเมทานอลต่อน้ำหนักโมเลกุลของ VOC ที่สนใจเป็นตัวปรับแก้ ซึ่งจะได้สมการเอมพิริคัลของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวและสมการของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สในกรณีนี้ ดังแสดงด้วยสมการ (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว

$$k_La(VOC) = (1.94 \times 10^{-7}) \exp(0.0556(T - 300.15)) \left(\frac{MW_{toluene}}{MW_{VOC}} \right) \quad (3.9)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ $Re = 0$

$$k_G a(VOC) = (3.55 \times 10^{-4}) \exp(0.0206(T - 300.15)) \left(\frac{MW_{methanol}}{MW_{VOC}} \right) \quad (3.10)$$

สำหรับ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 331.15 \text{ K}$ และ $Re = 0$

สมการ (3.9) และสมการ (3.10) พัฒนาจากข้อมูลการระเหยขณะที่ไม่มีการกวน ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำจึงเหมาะสมสำหรับการทำนาย $K_{OL}a$ ในกรณีที่ไม่มีกวนและมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำเท่านั้น

3.5.2 กรณีที่มีการกวนและไม่มีเกรเดียนต์ของอนุภาคน้ำในแหล่งน้ำ

ในกรณีที่มีการกวนแหล่งน้ำที่อนุภาคน้ำต่างๆ พบว่าอนุภาคน้ำจะสม่ำเสมอทั่วทั้งถัง ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของ $k_L a$ และ $k_G a$ กับ Re ที่อยู่บนฐานของโทลูอีนและเมทานอล ดังแสดงด้วยสมการ (3.2) และ (3.4) สามารถปรับแก้เป็นสมการทั่วไปเพื่อให้ใช้ได้กับ VOCs อื่นๆ ที่อนุภาคน้ำใดๆ ได้โดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวปรับแก้ได้ดังสมการ (3.11) และ (3.12)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว

$$k_L a(VOC) = (1.94 \times 10^{-7} + 5.62 \times 10^{-13} Re^{1.62}) \left(\frac{D_{VOC-water}}{D_{toluene-water}} \right) \quad (3.11)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 327.15 \text{ K}$ with no gradient in T

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส

$$k_G a(VOC) = (3.55 \times 10^{-4} + 3.24 \times 10^{-8} Re^{0.94}) \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{Methanol-air}} \right) \quad (3.12)$$

สำหรับ $0 \leq Re \leq 2.05 \times 10^5$ และ $300.15 \text{ K} \leq T \leq 327.15 \text{ K}$ with no gradient in T

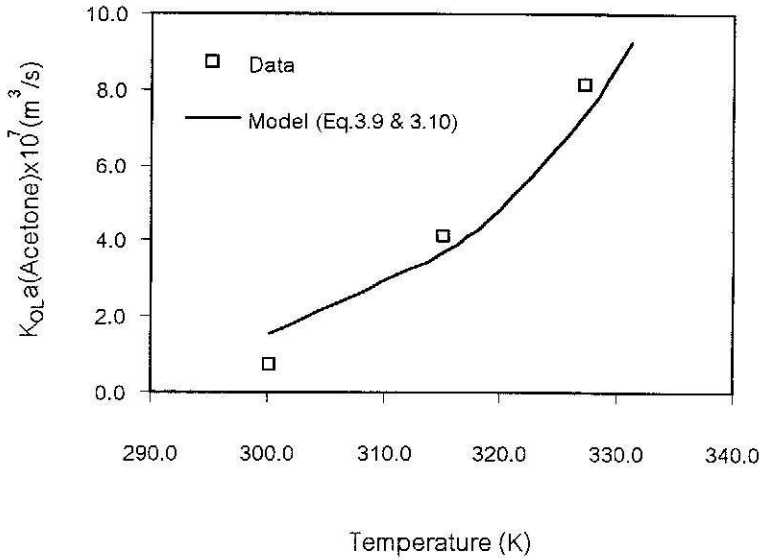
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการ k_{La} และ k_{Ga} โดยการเปรียบเทียบ K_{O_2a} ที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลของ k_{La} และ k_{Ga} กับผลการทดลอง

3.6.1 กรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำที่ไม่มีการกวน

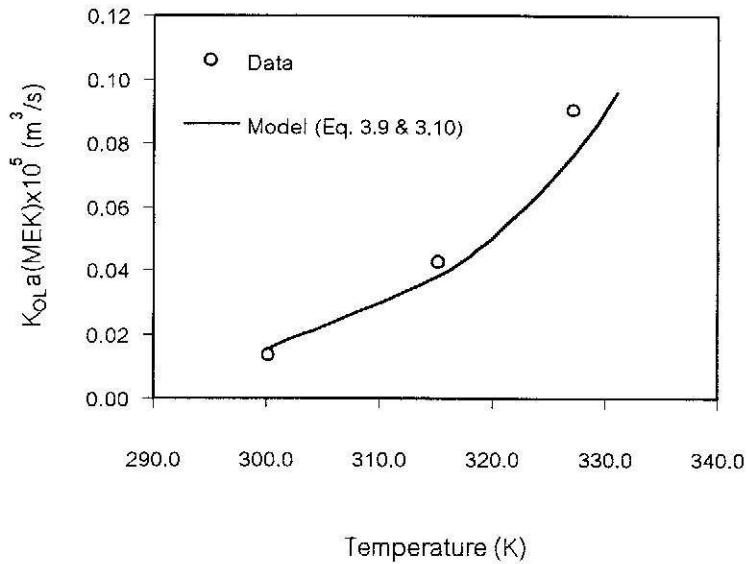
การตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพิริคัลของ k_{La} และ k_{Ga} สำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (สมการ (3.9) และ สมการ (3.10)) ทำโดยทำการทดลองวัด K_{O_2a} ของ VOCs ที่สนใจ ที่ระเหยจากแหล่งน้ำในสถานะที่ไม่มีการกวนและมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าได้จากการคำนวณโดยใช้ k_{La} และ k_{Ga} ร่วมกับทฤษฎีสองฟิล์ม ค่า k_{La} และ k_{Ga} ของ VOCs ที่ใช้ตรวจสอบคือ อะซีโตน , MEK และเบนซีน ที่คำนวณโดยใช้สมการ (3.9) และ (3.10) แสดงดังตาราง 1 ส่วนค่า K_{O_2a} ที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (สมการ (1.9)) และใช้ค่า k_{La} และ k_{Ga} เหล่านี้ แสดงเปรียบเทียบกับค่า K_{O_2a} ที่ได้จากการทดลองใน รูปที่ 9-รูปที่ 12

ตาราง 1 แสดงค่าการคำนวณ k_{Ga} และ k_{La} ของ VOCs ที่อุณหภูมิต่างๆ

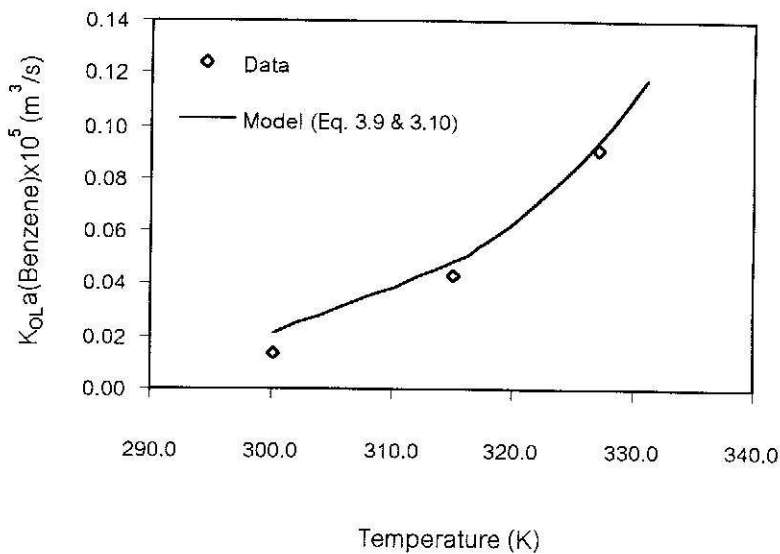
Compound	T (K)	H (atm m ³ mol ⁻¹)	k_{Ga} (m ³ s ⁻¹) × 10 ⁴	k_{La} (m ³ s ⁻¹) × 10 ⁷
Acetone	300.15	3.694×10^{-5}	2.640	2.443
	315.15	7.660×10^{-5}	3.590	5.626
	327.15	1.308×10^{-4}	4.600	13.809
MEK	300.15	5.591×10^{-5}	2.370	2.193
	304.15	6.960×10^{-5}	2.570	2.739
	315.15	1.235×10^{-4}	3.220	5.049
	321.15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



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของอะซีโตน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำและไม่มีการกวน (อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ อยู่ในช่วง 300.15-327.15 K)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำและไม่มีการกวน (อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ อยู่ในช่วง 300.15-327.15 K)



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่า K_{oLa} ของเบนซีน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำและไม่มีการกวน (อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ อยู่ในช่วง 300.15-327.15 K)

จากรูปที่ 9-11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่า K_{oLa} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลที่พัฒนาขึ้นสำหรับกรณีที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิกับผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการการระเหยของ VOCs 3 ชนิดประกอบด้วย อะซีโตน MEK และเบนซีน ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำที่แปรเปลี่ยนในช่วง 300.15 K และ 327.15 K และความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm พบว่า K_{oLa} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัลมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง และเนื่องจาก อะซีโตน ถูกเลือกเป็นตัวแทนของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยจากน้ำควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส ในขณะที่ เบนซีน ถูกเลือกเป็นตัวแทนของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยจากน้ำควบคุมโดยฟิล์มของเหลว และ MEK เป็นตัวแทนของ VOCs ที่ทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวมีผลต่อการระเหยอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการที่สมการเอ็มพิริคัลที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนาย K_{oLa} ของ VOCs ทั้งสามประเภทได้ดีแสดงว่าสมการเอ็มพิริคัลดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับ VOCs ทุกประเภทที่ระเหยจากน้ำที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและมีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ศึกษาได้

3.6.2 กรณีที่มีการกวนและไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแหล่งน้ำ

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพิริคัลของ $k_G a$ และ $k_L a$ สำหรับกรณีที่ไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (สมการ (3.11) และสมการ (3.12)) เมื่อประยุกต์ใช้กับสภาวะที่ความเร็วรอบแปรเปลี่ยนและอุณหภูมิของแหล่งน้ำคงที่ ทำได้โดยการเปรียบเทียบระหว่าง $K_{O_L a}$ ที่ได้จากการทดลองโดยตรง จากกระบวนการกวนระเหยของ อะซีโตน MEK และเบนซีนจากแหล่งน้ำ กับ $K_{O_L a}$ ที่คำนวณโดยใช้สมการ (3.11) และ (3.12) ร่วมกับสมการ (1.9) ค่า $k_G a$ และ $k_L a$ ของ อะซีโตน MEK และเบนซีนที่คำนวณจากสมการ (3.11) และ (3.12) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่างๆแสดงดังตาราง 2 และค่า $K_{O_L a}$ ที่คำนวณได้จาก $k_G a$ และ $k_L a$ เหล่านี้ แสดงเปรียบเทียบกับ $K_{O_L a}$ ที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 12 -รูปที่ 15

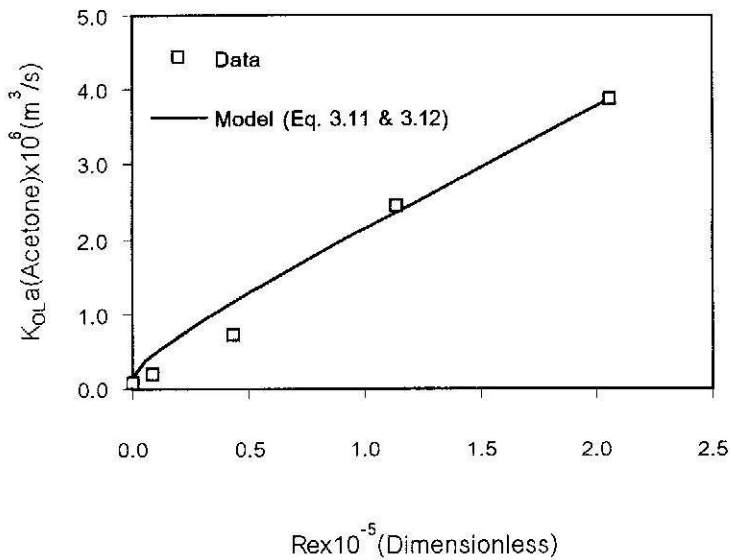
ตาราง 2 แสดงผลการคำนวณ $k_G a$ และ $k_L a$ ของ VOCs

2.1 กรณีอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 27 °C

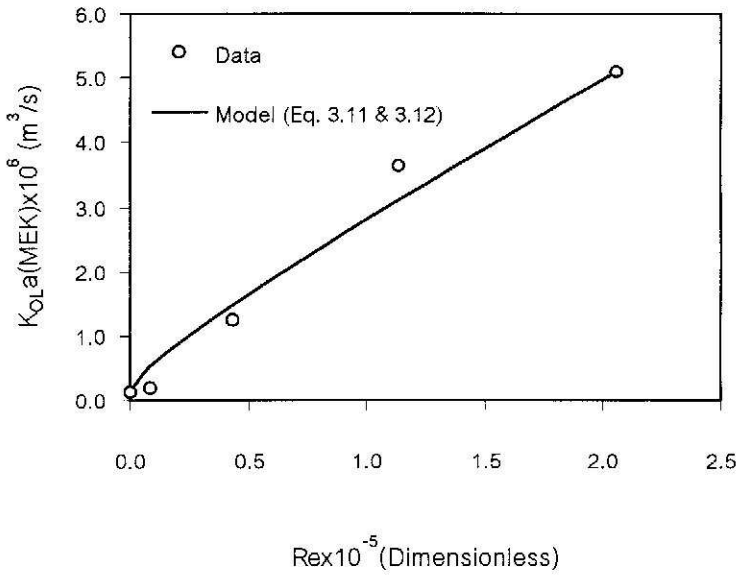
Compound	$Re \times 10^{-5}$	$k_G a \times 10^3$ ($m^3 s^{-1}$)	$k_L a \times 10^5$ ($m^3 s^{-1}$)	$H \times 10^3$ ($atm m^3 mol^{-1}$)	$D_{VOC-air} \times 10^5$ ($m^2 s^{-1}$)	$D_{VOC-liquid} \times 10^5$ ($cm^2 s^{-1}$)
Acetone	0.000	0.261	0.002	0.037	1.107	1.213
	0.087	0.382	0.020	0.037	1.107	1.213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

2.2 กรณีอุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

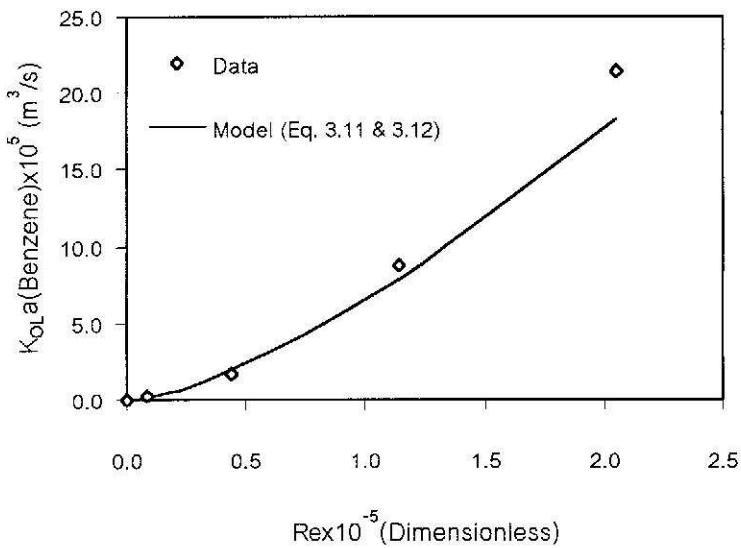
Compound	$Re \times 10^{-5}$	$k_{Ga} \times 10^2$ ($m^3 s^{-1}$)	$k_{La} \times 10^5$ ($m^3 s^{-1}$)	$H \times 10^3$ ($atm m^3 mol^{-1}$)	$D_{VOC-air} \times 10^5$ ($m^2 s^{-1}$)	$D_{VOC-liquid} \times 10^5$ ($cm^2 s^{-1}$)
Acetone	0.000	0.026	0.025	0.076	1.214	1.273
	0.437	0.081	2.427	0.076	1.214	1.273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



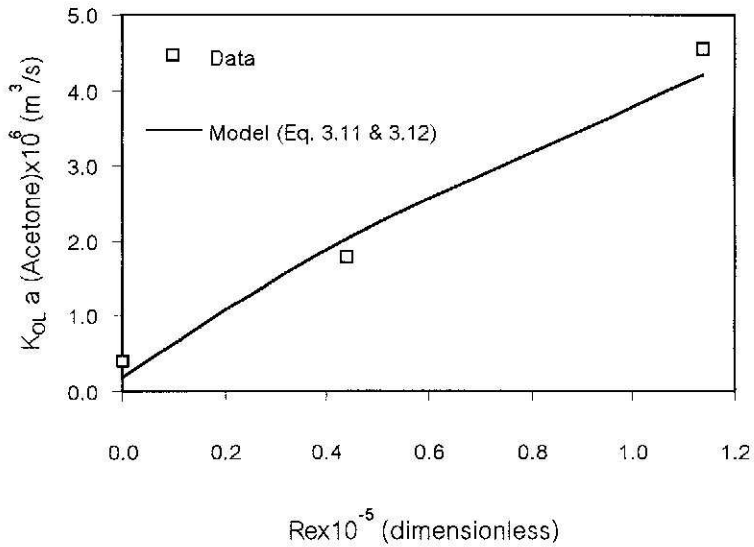
รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่า $K_{O_2 a}$ ของอะซิโตนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K



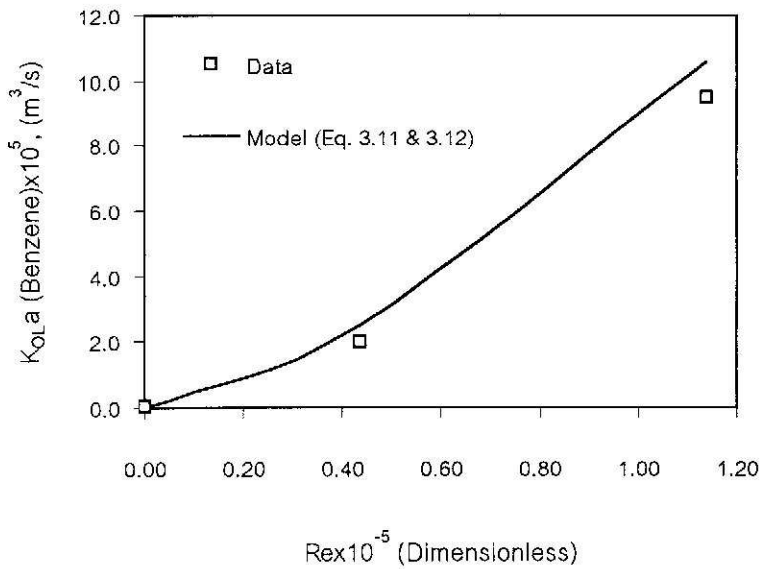
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของ MEK ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของเบนซีนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการเอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 300.15 K



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของอะซิโตน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 315.15 K



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบค่า K_{OLa} ของเบนซีน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายด้วยสมการ เอ็มพิริคัล (สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.12)) ภายใต้สภาวะที่ความเร็วรอบเปลี่ยนในช่วง 0-470 rpm และอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งน้ำเท่ากับ 315.15 K

จากรูปที่ 12-16 พบว่า K_{Oa} ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการมีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดได้โดยตรงจากการทดลองในทุกกรณีที่ตรวจสอบ และเนื่องจาก อะซีโตน เป็นตัวแทนของ VOCs ที่การระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส เบนซีนเป็นตัวแทนของ VOC ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลว และ MEK เป็นตัวแทนของ VOC ที่ทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวมีผลต่อการระเหยอย่างมีนัยสำคัญ การที่สมการเอ็มพิริคัล สามารถทำนาย K_{Oa} ของ VOCs ทั้งสามประเภทได้ดีแสดงว่าสมการดังกล่าวสามารถใช้กับ VOCs ทุกประเภทในสภาวะที่ใกล้เคียงกับสภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ได้

3.7 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

ในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถกล่าวได้ว่าการกวนและอุณหภูมิของน้ำ เป็นปัจจัยหลักที่มีผลทำให้ VOCs ระเหยจากบ่อกวนได้อย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องมีวิธีการลดหรือควบคุมการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนเติมอากาศ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนเติมอากาศโดยใช้สารลดแรงตึงผิว ซึ่งสารลดแรงตึงจะทำหน้าที่ก้ำบังพื้นผิวของการระเหย (surface barrier) และลดความปั่นป่วนบริเวณผิวสัมผัส ทำให้สามารถลดการระเหยของ VOCs ได้ จึงนำไปสู่การศึกษามวลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$ และ $k_O a$ ที่สภาวะต่างๆ

3.7.1 ผลของปริมาณของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ความเร็วรอบคงที่

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษาคือ sodium dodecyl sulphate (SDS) การทดลองเริ่มต้นโดยการเตรียมสารละลาย VOCs ในน้ำปริมาตร 50 ลิตร เติมลงในถังกวน จากนั้นจึงเติม SDS ลงในสารละลายของ VOCs ข้างต้น ความเข้มข้นของ SDS ที่ใช้ในการศึกษาแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 100-400 mg L⁻¹ ความเร็วรอบที่ใช้ในทุกการทดลองถูกควบคุมให้คงที่ที่ 100 rpm

3.7.1.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$

ทำการวัดค่า $k_L a$ จากกระบวนการระเหยของทุโลอื่นจากน้ำตามวิธีการที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ค่า $k_L a$ ของทุโลอื่นที่ได้ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆสามารถแสดงในเทอมของตัวแปรไร้หน่วย ในรูปของอัตราส่วนของ $k_L a$ ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_L a$ ที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวดังสมการ (3.13)

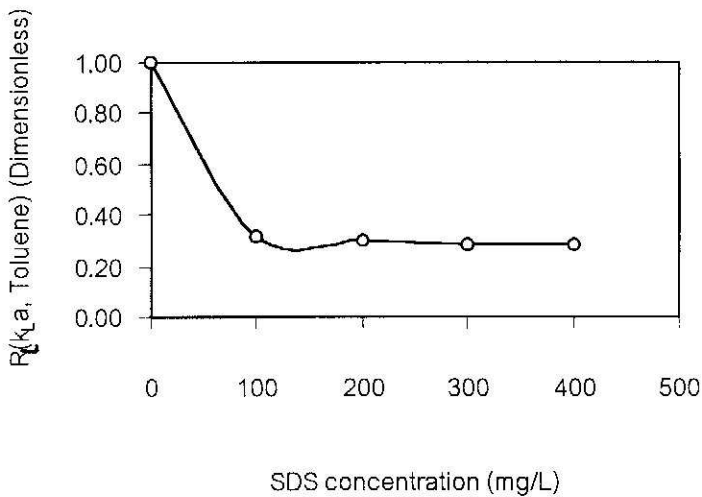
$$R_L = \frac{(k_L a)_s}{(k_L a)_0} \quad (3.13)$$

เมื่อ R_L = อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลว, ไม่มีหน่วย

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

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

ความสัมพันธ์ระหว่าง R_L ของโกลูอื่นกับ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว R_L ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

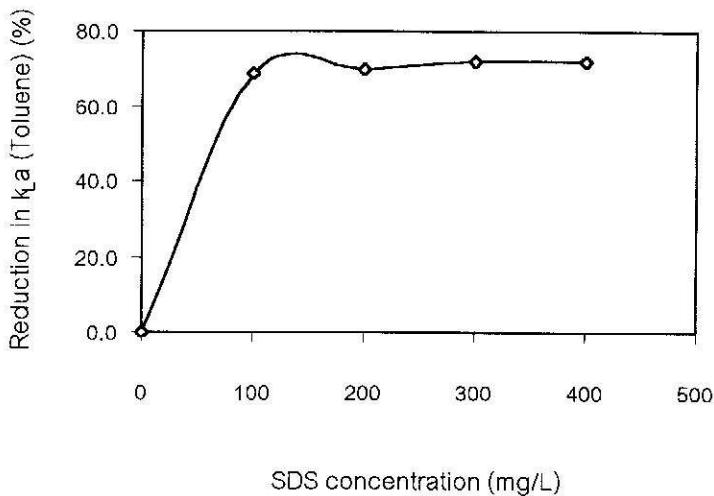
จากรูปที่ 17 พบว่า R_L ของโกลูอื่นจะลดลงตามความเข้มข้นของ SDS ที่เพิ่มขึ้นในช่วงตั้งแต่ 0-100 mg/L จากนั้นจะเริ่มคงตัวในช่วงความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 200-300 mg/L โดยจุดที่ R_L เริ่มคงตัวแสดงว่า SDS ได้จัดเรียงโมเลกุลเป็น monolayer ครอบคลุมผิวน้ำอย่างสมบูรณ์แล้ว ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการลดสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสามารถแสดงในรูปแบบของร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (Reduction in $k_L a$) เทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวดังสมการ (3.14)

$$\text{Reduction in } k_L a (\%) = (1 - R_L) \times 100 \quad (3.14)$$

ค่าร้อยละการลดลงของ k_{La} ที่คำนวณได้ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆแสดงดังตาราง 3 และรูปที่ 18

ตาราง 3 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mg L ⁻¹)	0	100	200	300	400
Reduction in k_{La} , (%)	0	69	70	72	72



รูปที่ 18 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

จากรูปที่ 18 พบว่า ร้อยละการลดลงของ k_{La} จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 300 mg/L พบว่า ร้อยละการลดลงของ k_{La} จะเริ่มคงตัว ทำให้เชื่อได้ว่าที่ความเข้มข้นดังกล่าว โมเลกุลของ SDS ได้จัดเรียงเป็น monolayer ที่ผิวน้ำได้สมบูรณ์ที่สุด monolayer ของ SDS จะกีดกันการแพร่ของโมเลกุลของโกลูอินและลดความปั่นป่วนบริเวณใต้ผิวน้ำ ส่งผลให้มีค่าร้อยละการลดลงของ k_{La} สูงสุด ก่อนที่จะคงตัวที่ความเข้มข้นของ SDS ที่สูงกว่า 300 mg/L ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของ SDS ที่เกินพอสำหรับการเรียงตัวเป็น monolayer จะเรียงตัวเป็น multi-layer ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกีดกันการระเหยต่ำกว่ากรณีของ monolayer นอกจากนี้แล้ว โมเลกุลของ SDS ที่เกินพอสำหรับการเรียงตัวเป็น monolayer อาจจะรวมตัวเป็น micelle อยู่ในน้ำแทนการอยู่ที่บริเวณผิวจึงไม่ช่วยในการกีดกันการ

ระเหยบริเวณผิวสัมผัส การเพิ่มความเข้มข้นของ SDS มากกว่า 300 mg/L จึงไม่สามารถเพิ่มค่าร้อยละการลดลงของ $k_L a$ ได้ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การเติม SDS ในน้ำสามารถลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 300 mg/L จะให้ค่าร้อยละการลดลงของ $k_L a$ สูงสุดเท่ากับ 72 %

3.7.1.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อ $k_G a$

ทำการวัดค่า $k_G a$ จากกระบวนการการระเหยของเมทานอลจากน้ำในทำนองเดียวกันกับดังที่ได้กล่าวถึงมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ค่า $k_G a$ ของเมทานอลที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆสามารถแสดงในเทอมของตัวแปรไร้หน่วยได้ในทำนองเดียวกับ $k_L a$ คือ

$$R_G = \frac{(k_G a)_s}{(k_G a)_o} \quad (3.15)$$

เมื่อ R_G = อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊ส ,
ไม่มีหน่วย

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

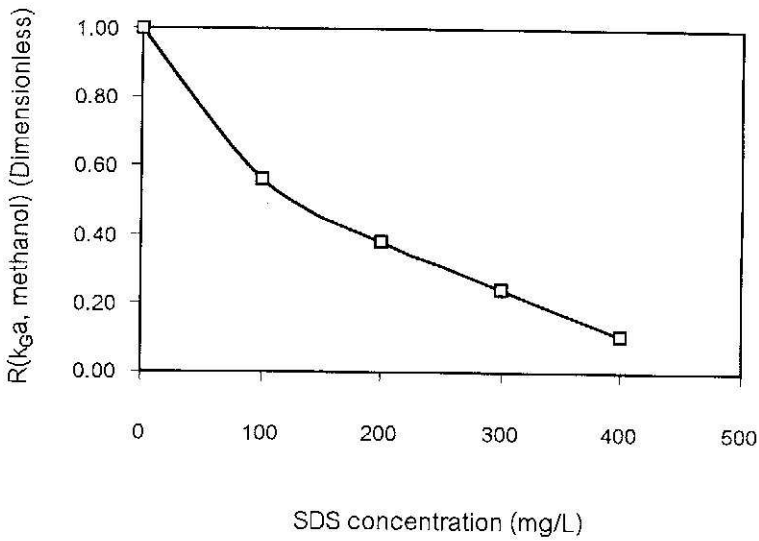
$(k_G a)_o$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรของฟิล์มแก๊สเมื่อไม่มีการเติม
สารลดแรงตึงผิว , $m^3 s^{-1}$

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R_G กับความเข้มข้นของ SDS แสดงดังรูปที่ 19 จากรูปดังกล่าวพบว่า R_G จะลดลงตามความเข้มข้นของ SDS ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับกรณีของ R_L นอกจากเหตุดังกล่าวแล้วจากการสังเกตพบว่าการกวนทำให้เกิดฟองของ SDS บนผิวน้ำโดยปริมาณของฟองที่เกิดจาก SDS จะเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วรอบที่ใช้ ฟองของสารลดแรงตึงผิวอาจมีผลในการป้องกันการระเหยเสริมกับฟิล์มแก๊สหรือช่วยป้องกันฟิล์มแก๊สได้ ทำให้สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สในกรณีที่มีการเติม SDS (โดยเฉพาะในสภาวะที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบสูงๆ) มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติม SDS มาก

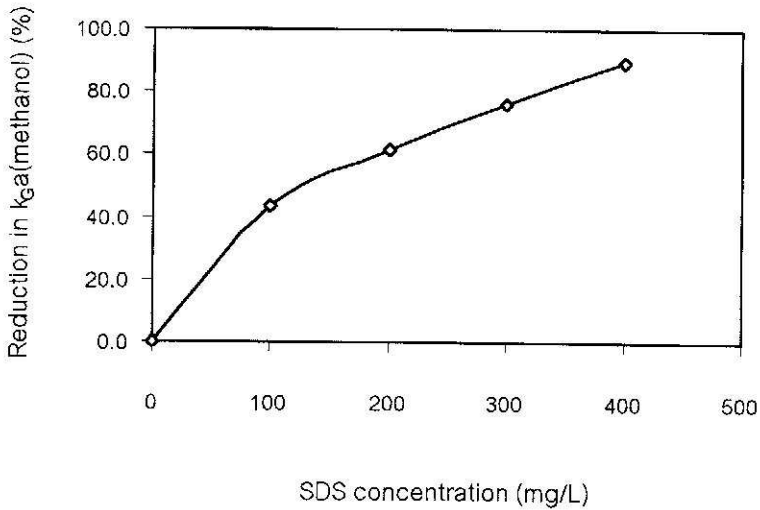
จากข้อมูลของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับกรณีที่มีและไม่มีการเติม SDS สามารถคำนวณร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สเทียบกับกรณีที่ไม่เติม SDS ได้ดังสมการ (3.16)

$$\text{Reduction in } k_G a(\%) = (1 - R_G) \times 100 \quad (3.16)$$

ค่าร้อยละการลดลงของ $k_G a$ ที่คำนวณได้จากสมการ (3.16) แสดงดังตาราง 4 และภาพประกอบ 20



รูปที่ 19 แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส R_G ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ



รูปที่ 20 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

ตาราง 4 ร้อยละการลดลงของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mg/L)	0	100	200	300	400
Reduction in k _{Ga} (%)	0	44	62	76	89

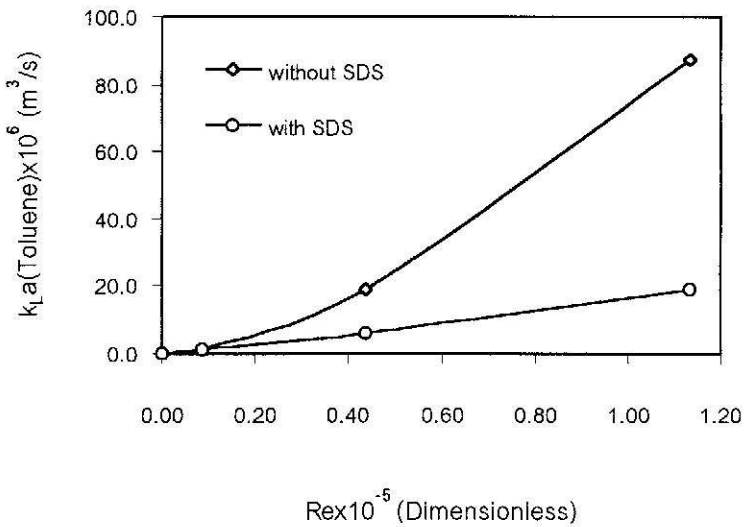
จากรูปที่ 20 พบว่าร้อยละการลดลงของ k_{Ga} เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ SDS ที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงของความเข้มข้นที่ศึกษา ซึ่งจะต่างจากกรณีของ k_{La} ที่ร้อยละการลดลงของ k_{La} จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วมีค่าคงที่โดยไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป ทำให้เชื่อได้ว่าการเกิดฟอง ของ SDS บนผิวน้ำมีผลต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สแต่อาจจะไม่มีผลต่อฟิล์มของเหลวที่อยู่ใต้ผิวน้ำ ร้อยละการลดลงของ k_{La} จึงเป็นผลมาจากการกีดกันการระเหยเนื่องชั้นโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวและการลดลงของความปั่นป่วนบริเวณใต้ผิวน้ำเป็นหลัก ซึ่งเมื่อโมเลกุลวางตัวเป็น monolayer คลุมผิวน้ำอย่างสมบูรณ์แล้วก็จะไม่สามารถเพิ่มร้อยละการลดลงของ k_{La} ได้อีกตามที่ได้อีกกล่าวมาแล้วข้างต้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นของ SDS ยังคงสามารถเพิ่มร้อยละการลดลงของ k_{Ga} ได้เพราะการเกิดฟองของ SDS บนผิวน้ำสามารถป้องกันการระเหยเสริมกับฟิล์มแก๊สหรือช่วยป้องกันฟิล์มแก๊สได้ ทำให้สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สในกรณีที่มีการเติม SDS มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ SDS อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งทำให้ค่าร้อยละการลดลงของ k_{Ga} เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ SDS ที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงของความเข้มข้นที่ศึกษา

3.7.2 ผลของความเร็วยุโรปต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในสภาวะที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว

ในหัวนี้จะเป็นการตรวจสอบคุณภาพของชั้นโมเลกุลของ SDS ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 300 mg/L เพื่อดูว่าชั้นโมเลกุลของ SDS ที่ความเข้มข้นดังกล่าวจะสามารถลด k_{La} และ k_{Ga} ภายใต้สภาวะที่มีการกวนแหล่งน้ำด้วยความเร็วรอบต่างๆ ได้หรือไม่ ซึ่งทำการทดลองโดย เตรียมสารละลาย VOCs ที่สนใจให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการปริมาตร 50 ลิตร และผสมสารลดแรงตึงผิว SDS ลงไปให้มีความเข้มข้น 300 mg/L จากนั้นจึงใส่สารละลายผลมดังกล่าวในถังกวนเติมอากาศและปรับความเร็วรอบให้ได้ตามต้องการทำการวัดความเข้มข้นของ VOCs ที่เวลาต่างๆ และหาค่า k_{La} หรือ k_{Ga} ได้จากข้อมูลความเข้มข้นกับเวลา

3.7.2.1 ผลของความเร็วยุโรปต่อ k_{La} ภายใต้สภาวะที่เติมสารลดแรงตึงผิว

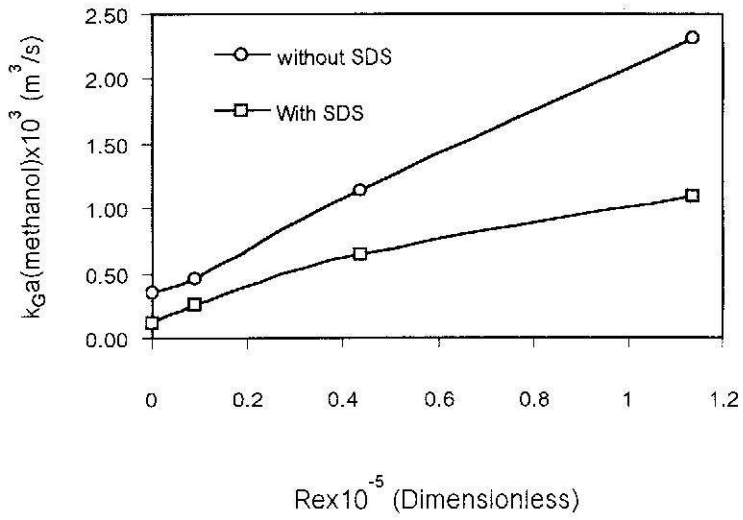
ทำการวัดค่า k_{La} ที่ความเร็วยุโรปต่างๆ จากกระบวนการระเหยของโทลูอินจากน้ำในทำนองเดียวกันกับที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} กับความเร็วรอบในเทอมของ Re สำหรับกรณีที่มีการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg/L แสดงเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม SDS ดังรูปที่ 21 ซึ่งจะพบว่าตลอดช่วงของ Re ที่ศึกษาการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg/L จะทำให้ k_{La} ลดต่ำลงประมาณ 1.3 ถึง 4.5 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น SDS จึงสามารถใช้เพื่อลดการระเหยของ VOCs ที่การระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลวภายใต้สภาวะที่มีความปั่นป่วนเนื่องจากการกวนได้ดี



รูปที่ 21 เปรียบเทียบ k_{La} ของโทลูอีน สำหรับกรณีที่มีและไม่เติม SDS ในน้ำ

3.7.2.2 ผลของความเร็รรอบต่อ k_{La} ภายใต้สภาวะที่เติมสารลดแรงตึงผิว

ทำการวัดค่า k_{La} จากกระบวนการระเหยของเมทานอลจากน้ำที่มีการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg/L และมีการกวนด้วยความเร็วรอบต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} กับ Re สำหรับกรณีที่มีการเติม SDS ในปริมาณ 300 mg/L แสดงเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม SDS ได้ดังรูปที่ 22 จากดังกล่าว พบว่าตลอดช่วงของ Re ที่ศึกษา การเติม SDS ในปริมาณ 300 mg/L จะทำให้ k_{La} ลดต่ำลงประมาณ 1.8 ถึง 3.0 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ดังนั้นจึงสามารถใช้ SDS เพื่อลดการระเหยของ VOCs ที่การระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส ในสภาวะที่มีความปั่นป่วนเนื่องจากการกวนได้



รูปที่ 22 เปรียบเทียบ k_{Ga} ของเมทานอล สำหรับกรณีที่มีและไม่เติม SDS ในน้ำ

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของความเร็วรอบในการกวาด ผลของอุณหภูมิของแหล่งน้ำ และผลของสารลดแรงตึงผิว ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs 5 ชนิดประกอบด้วย เมทานอล อะซีโตน เมทิลเอทิล คีโตน (MEK) เบนซีน และทูลอีน เมทานอลและทูลอีนถูกเลือกเพื่อศึกษาถึงปัจจัยข้างต้นต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (gas film coefficient, k_{Ga}) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (liquid film coefficient, k_{La}) ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปผลจากการศึกษาได้ดังนี้

1. k_{Ga} แปรผันกับความเร็วรอบยกกำลัง 0.94 ($k_{Ga} \propto Re^{0.94}$) ในขณะที่ k_{La} แปรผันกับกับความเร็วรอบยกกำลัง 1.62 ($k_{La} \propto Re^{1.62}$)
2. ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{Ga} และ k_{La} กับอุณหภูมิเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส
3. ข้อมูล k_{Ga} ของเมทานอล และข้อมูล k_{La} ของทูลอีน ถูกพัฒนาเป็นสมการเอมพิริคัลของ k_{Ga} และ k_{La} บนฐานของเมทานอลและทูลอีน ตามลำดับ เมื่อปรับแก้สมการเอมพิริคัลดังกล่าวด้วยตัวปรับแก้ที่เหมาะสมแล้วพบว่า สมการเอมพิริคัลของ k_{Ga} และ k_{La} ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนาย K_{OLa} ของอะซีโตน เบนซีน และ MEK ซึ่งเป็นตัวแทนของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลว และ VOCs ที่ทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวมีผลต่อการระเหยได้ดี สามารถสรุปได้ว่าสมการเอมพิริคัลของ k_{Ga} และ k_{La} ที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัยนี้สามารถใช้ทำนาย K_{OLa} ของ VOCs ทุกชนิดในสภาวะที่ใกล้เคียงกับสภาวะที่ใช้ในการทดลองได้
4. การเติมสารลดแรงตึงผิว Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ลงในน้ำ จะสามารถลด k_{Ga} และ k_{La} ได้ในช่วงตั้งแต่ 1.8 ถึง 3.0 และ 1.8 ถึง 4.6 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม SDS โดยขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของการกวาด
5. การเติม SDS ลงในบ่อกวาดเติมอากาศจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถใช้ในการลดการระเหยของ VOC จากบ่อกวาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

- [1] G. Tchobanoglous and F. Burton: "Volatilization and Gas Stripping of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wastewater Management Facilities" in Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse., McGraw-Hill, Inc., Third edition, pp.287-293, 1991
- [2] J. Chern and C. Yu: "Volatile Organic Compound Emission from Diffused Aeration Systems: Experiment and Modeling", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 38, No. 5, pp.2156-2159, 1999
- [3] J. Chern and C. Yu: "Oxygen Transfer Modeling of Diffused Aeration Systems", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 36, No. 12, pp. 5447-5453, 1997
- [4] S.H. Lin, T. M. Lin, and H.G. Leu; Determination of Oxygen Diffusion Coefficient in Wastewaters", Journal of Environmental Engineering. March, pp.265-271, 1998
- [5] P.V. Robert, C. Munz and P. Dandliker: " Modeling Volatile Organic Solute Removal by Surface and Bubble Aeration" Journal WPCF, Vol. 56, No. 2, pp.157-163, 1984
- [6] P.S. Liss: " Processes of Gas Exchange Across an Air-Water Interface", Deep-Sea Research, Vol. 20, pp. 221-238, 1973
- [7] C. Bunyakan, P. Tongsoi and C. Tongurai: " Film Mass Transfer Coefficient for Prediction of Volatile Organic Compound Evaporation Rate from Open Water Basin", Songklanakrin J. Sci. Technol., Vol. 23, No. 4. Pp. 563-577, 2001
- [8] R.S. Brodkey and H.C. Hershey: " Agitation" in Transport Phenomena A Unified Approach, McGraw-Hill Book Company, pp. 359-398, 1981
- [9] J. Staudinger and P.V. Robert: " A Critical Review of Henry's Law Constants for Environmental Application", Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. Vol. 26, pp. 205-297, 1996
- [10] W.G. Whitman. Chem. Metall. Engng. Vol.29. pp.146, 1923

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ก.1 $K_{OL}a$ และ k_Ga ของเมทานอลที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C

Speed (rpm)	$Re \times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^7 \text{ (m}^3/\text{s)}$	$k_Ga \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$
0	0.00	0.74	0.35
20	0.09	0.95	0.46
60	0.26	1.35	0.65
100	0.44	2.38	1.15
260	1.14	4.79	2.31
470	2.06	7.24	3.49

ก.2 $K_{OL}a$ และ k_Ga ของทูลอินที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C

Speed (rpm)	$Re \times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^5 \text{ (m}^3/\text{s)}$	$k_La \times 10^5 \text{ (m}^3/\text{s)}$
0	0.00	0.02	0.02
20	0.09	0.12	0.12
60	0.26	0.66	0.66
100	0.44	1.91	1.91
260	1.14	8.75	8.75
470	2.06	22.74	22.74

ก.3 $K_{OL}a$ และ k_Ga ของเมทานอลที่อุณหภูมิของน้ำต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

T ($^{\circ}\text{C}$)	T (K)	$K_{OL}a \times 10^7 \text{ (m}^3/\text{s)}$	$k_Ga \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$
27	300.15	0.74	0.35
40	313.15	1.82	0.45
45	318.15	3.19	0.61
50	323.15	5.05	0.76
55	328.15	6.58	0.79

ก.4 $K_{OL}a$ และ k_La ของทุลิตอินที่อุณหภูมิของน้ำต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

T (°C)	T (K)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)	$k_La \times 10^6$ (m ³ /s)
27	300.15	0.19	0.19
40	313.15	0.44	0.44
45	318.15	0.66	0.66
50	323.15	0.94	0.94
55	328.15	1.02	1.02

ก.5 $K_{OL}a$ ของอะซิโตนที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C และ 40°C

Speed (rpm)	Re $\times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)	
		at 27 °C	at 40 °C
0	0.00	0.08	0.41
20	0.09	0.19	-
60	0.26	-	-
100	0.44	0.74	1.79
260	1.14	2.44	4.55
470	2.06	3.88	-

ก.6 $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C

Speed (rpm)	Re $\times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)
0	0.00	0.14
20	0.09	0.19
100	0.44	1.25
260	1.14	3.63
470	2.06	5.09

ก.7 $K_{OL}a$ ของเบนซินที่ความเร็วรอบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C และ 40°C

Speed (rpm)	$Re \times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^5 \text{ (m}^3/\text{s)}$	
		at 27°C	at 40°C
0	0.00	0.01	0.04
20	0.09	0.27	-
60	0.26	-	-
100	0.44	1.67	2.05
260	1.14	8.73	9.48
470	2.06	21.44	-

ก.8 $K_{OL}a$ ของ อะซิโตน MEK และ เบนซินที่อุณหภูมิของน้ำต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 0 rpm

T (K)	$K_{OL}a \text{ (acetone)} \times 10^7$ (m^3/s)	$K_{OL}a \text{ (MEK)} \times 10^7$ (m^3/s)	$K_{OL}a \text{ (benzene)} \times 10^7$ (m^3/s)
300.15	0.76	1.39	1.39
313.15	4.12	4.29	4.37
323.15	8.15	9.05	5.16

ก.9 $K_{OL}a$ และ k_Ga ของเมทานอลที่ความเข้มข้นของ SDS ต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 100 rpm

SDS Conc. (mg/L)	$K_{OL}a \times 10^7 \text{ (m}^3/\text{s)}$	$k_Ga \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$	$R(k_G)$
0	2.55	1.23	1.00
100	1.23	0.59	0.48
200	0.87	0.42	0.34
300	0.56	0.27	0.22
400	0.32	0.16	0.13

ก.10 $K_{OL}a$ และ k_Ga ของเมทานอลที่ความเร็วรอบต่างๆ ความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 300 mg/L

Speed (rpm)	$Re \times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^7$ (m^3/s)	$k_Ga \times 10^3$ (m^3/s)
0	0	0.31	0.15
20	0.087	0.49	0.24
100	0.437	0.56	0.27
260	1.137	2.66	1.28

ก.11 $K_{OL}a$ และ k_La ของทูลอิลีนที่ความเข้มข้นของ SDS ต่างๆ ความเร็วรอบเท่ากับ 100 rpm

SDS Conc. (mg/L)	$K_{OL}a \times 10^5$ (m^3/s)	$k_La \times 10^5$ (m^3/s)	$R(k_L)$
0	1.91	1.91	1.00
100	0.59	0.59	0.31
200	0.55	0.55	0.29
300	0.54	0.54	0.28
400	0.53	0.53	0.28

ก.12 $K_{OL}a$ และ k_La ของทูลอิลีนที่ความเร็วรอบต่างๆ ความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 300 mg/L

Speed (rpm)	$Re \times 10^{-5}$	$K_{OL}a \times 10^5$ (m^3/s)	$k_La \times 10^5$ (m^3/s)
0	0	0.01	0.01
20	0.087	0.096	0.096
100	0.437	0.54	0.54
260	1.137	1.89	1.89

ภาคผนวก ข

ข.1 ค่าคงที่ของเฮนรีของ VOCs ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ค่าคงที่ของเฮนรี, H (atm m ³ mol ⁻¹)				
	ทูลอีน	เบนซีน	MEK	อะซีโตน	เมทานอล
300.15	7.193×10^{-3}	6.850×10^{-3}	5.591×10^{-5}	3.694×10^{-5}	5.106×10^{-6}
315.15	1.233×10^{-2}	1.312×10^{-2}	1.236×10^{-4}	7.662×10^{-5}	1.165×10^{-5}
321.15	1.509×10^{-2}	1.673×10^{-2}	1.662×10^{-4}	1.006×10^{-4}	1.585×10^{-5}
327.15	1.832×10^{-2}	2.114×10^{-2}	2.211×10^{-4}	1.309×10^{-4}	2.133×10^{-5}
331.15	2.077×10^{-2}	2.460×10^{-2}	2.659×10^{-4}	1.551×10^{-4}	2.585×10^{-5}

ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในฟิล์มแก๊สของ VOCs ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในฟิล์มแก๊ส, $D_{\text{VOC-air}}$ (m ² s ⁻¹)				
	ทูลอีน	เบนซีน	MEK	อะซีโตน	เมทานอล
300.15	8.724×10^{-6}	9.705×10^{-6}	9.708×10^{-7}	1.107×10^{-5}	1.505×10^{-5}
315.15	9.577×10^{-6}	1.065×10^{-5}	1.065×10^{-5}	1.214×10^{-5}	1.651×10^{-5}
321.15	9.927×10^{-6}	1.104×10^{-5}	1.104×10^{-5}	1.258×10^{-5}	1.711×10^{-5}
327.15	1.028×10^{-5}	1.143×10^{-5}	1.143×10^{-5}	1.303×10^{-5}	1.772×10^{-5}
331.15	1.052×10^{-5}	1.169×10^{-5}	1.169×10^{-5}	1.333×10^{-5}	1.813×10^{-5}

ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในฟิล์มของเหลวของ VOCs ที่สนใจที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในฟิล์มของเหลว, $D_{\text{VOC-liquid}}$ ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)				
	ทูโลอิน	เบนซีน	MEK	อะซีโตน	เมทานอล
300.15	9.351×10^{-6}	1.351×10^{-5}	1.039×10^{-5}	1.213×10^{-5}	1.737×10^{-5}
315.15	9.818×10^{-6}	1.419×10^{-5}	1.091×10^{-5}	1.273×10^{-5}	1.824×10^{-5}
321.15	1.000×10^{-5}	1.447×10^{-5}	1.112×10^{-5}	1.297×10^{-5}	1.859×10^{-5}
327.15	1.019×10^{-5}	1.474×10^{-5}	1.133×10^{-5}	1.322×10^{-5}	1.893×10^{-5}
331.15	1.032×10^{-5}	1.492×10^{-5}	1.147×10^{-5}	1.338×10^{-5}	1.917×10^{-5}

ข.4 น้ำหนักโมเลกุลของ VOCs ที่สนใจ

สารประกอบอินทรีย์	น้ำหนักโมเลกุล (g gmol^{-1})
เมทานอล	32.042
อะซีโตน	58.080
MEK	72.107
เบนซีน	78.113
ทูโลอิน	92.141

ภาคผนวก ค

ค.1 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร ($K_{OL}a$) จากการระเหยเบนขึ้นจากแหล่งน้ำ สำหรับการทดลองที่ความเร็วรอบเท่ากับ 260 rpm และที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 27 °C

1. คำนวณ จากข้อมูลการทดลอง

จากการทำดูลมมวลรอบบ่อเติมอากาศจะได้ว่า

$$\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,0}} = -\frac{K_{OL}a}{V} t$$

- เมื่อ $K_{OL}a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร, $m^3 s^{-1}$
 $C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t , $mol m^{-3}$
 $C_{L,0}$ = ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวที่เวลาเริ่มต้น, $mol m^{-3}$
 V = ปริมาตรของสารละลาย, m^3
 t = เวลาที่ใช้, s

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

$$\frac{-K_{OL}a}{V} = -1.746 \times 10^{-3}$$

และ $V = 0.05 m^3$

ดังนั้นจะได้ค่า $K_{OL}a = 8.729 \times 10^{-5} m^3 s^{-1}$

2. คำนวณโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม

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

- เมื่อ $k_L a$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 s^{-1}$
 $k_G a$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $m^3 s^{-1}$

H = ค่าคงที่ของเฮนรี่, $\text{atm m}^3 \text{mol}^{-1}$

R = ค่าคงที่ของแก๊สสากล, $\text{m}^3 \text{atm mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

T = อุณหภูมิของน้ำ, K

จากทฤษฎีจะเห็นได้ว่าค่า K_{O_2a} เป็นฟังก์ชันกับ k_{La} , k_{Ga} และ H จึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ก่อน

การคำนวณค่าคงที่ของเฮนรี่ (H)

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

เมื่อ $k_H^\ominus = 160 \text{ mol L}^{-1} \text{atm}^{-1}$ (Staudinger and Roberts, 1996)

$$\frac{d \ln k_H^\ominus}{d(1/T)} = \frac{-\Delta H_{\text{solution}}}{R} = 4100$$

$$k_H = 160 \exp\left(4100 \left(\frac{1}{300.15} - \frac{1}{298.15}\right)\right)$$

$$H = 1/k_H = 6.850 \times 10^{-3} \text{ atm m}^{-3} \text{mol}^{-1}$$

การคำนวณค่า Re

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

เมื่อ N = ความเร็วรอบ, rps

D_R = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, m

ν = kinetic viscosity, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

$$= \mu \rho$$

ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย, kg m^{-3}

μ = ความหนืดของสารละลาย, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$

ดังนั้นที่ความเร็วรอบ 260 rpm จะได้

$$Re = \frac{(4.333) \times (0.15)^2}{8.876 \times 10^{-7}} = 113693$$

การคำนวณค่า $D_{\text{benzene-liquid}}$ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

$$D_{AB} = \frac{(7.4 \times 10^{-8}) (\phi M_B)^{0.5} T}{\mu v_A^{0.6}}$$

เมื่อ D_{AB} = การแพร่ของสาร A ในตัวทำละลาย B, $m^2 s^{-1}$

M_B = น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย, $g mol^{-1}$

T = อุณหภูมิ, K

μ = ความหนืดของสารละลาย, cp

v_A = solute molal volume at normal boiling point, $cm^3 mol^{-1}$

ϕ = 2.26 สำหรับตัวทำละลายเป็นน้ำ

แทนค่า $M_B = 18.02 g mol^{-1}$

T = 300.15 K

$\mu = 0.725 cp$

$v_A = 96.379 cm^3 mol^{-1}$

จะได้
$$D_{\text{benzene-liquid}} = \frac{(7.4 \times 10^{-8}) ((2.26)(18.02))^{0.5} (300.15)}{(0.725) (96.379)^{0.6}}$$

$$D_{\text{benzene-liquid}} = 1.352 \times 10^{-5} cm^2 s^{-1}$$

การคำนวณค่า $D_{\text{toluene-liquid}}$ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

คำนวณเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.2 แต่เปลี่ยน $v_A = 118.718 cm^3 mol^{-1}$

$$D_{\text{toluene-liquid}} = \frac{(7.4 \times 10^{-8}) ((2.26)(18.02))^{0.5} (300.15)}{(0.725) (118.718)^{0.6}}$$

$$D_{\text{toluene-liquid}} = 9.351 \times 10^{-6} cm^2 s^{-1}$$

การคำนวณค่า $D_{\text{benzene-air}}$ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

$$D_{AB} = \frac{10^{-3} \times (3.03 - (0.98 / \sqrt{M_{AB}})) \times T^{3/2}}{P_t \sqrt{M_{AB}} (r_{AB})^2 f(kT / \mathcal{E}_{AB})}$$

$$r_A = 1.18 v_A^{1/3}$$

$$r_{AB} = \sqrt{(r_A)(r_B)}$$

$$\frac{\mathcal{E}}{k} = 1.15 T_b$$

$$\frac{\mathcal{E}_{AB}}{k} = \sqrt{(\mathcal{E}/k)_A (\mathcal{E}/k)_B}$$

เมื่อ	D_{AB}	= diffusivity, m^2s^{-1}
	T	= อุณหภูมิ, K
	M_A, M_B	= น้ำหนักโมเลกุลของสาร A และสาร B ตามลำดับ, g mol^{-1}
	p_t	= ความดันสัมบูรณ์, bar
	r_{AB}	= molecular separation of collision, \AA
	\mathcal{E}_{AB}	= energy of molecular attraction
	k	= Boltzmann's constant
	$f(kT/\mathcal{E}_{AB})$	= collision function

แทนค่า	v_A	= $96.379 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$
	T	= 300.15, K
	M_A	= 78.11 g mol^{-1}
	M_B	= 28.97 g mol^{-1}
	T_b	= 353.25 K
	r_A	= 5.410 \AA
	r_B	= 3.620 \AA
	$f(kT/\mathcal{E}_{AB})$	= 1.195

จะได้

$$D_{\text{benzene-air}} = \frac{10^{-3} \times (3.03 - (0.98 / \sqrt{42.297})) \times 300.15^{3/2}}{\sqrt{42.297} \times (1.01325) \times (4.425)^2 \times (1.195)}$$

$$D_{\text{benzene-air}} = 9.705 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

การคำนวณค่า $D_{\text{methanol-air}}$ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

คำนวณเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยน

$$v_A = 42.284 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$T = 300.15, \text{ K}$$

$$M_A = 32.04 \text{ kg kmol}^{-1}$$

$$M_B = 28.97 \text{ kg kmol}^{-1}$$

$$T_b = 337.85 \text{ K}$$

$$r_A = 4.111 \text{ }^\circ\text{A}$$

$$r_B = 3.620 \text{ }^\circ\text{A}$$

$$f(kT/\epsilon_{AB}) = 1.184 \quad 5$$

จะได้

$$D_{\text{methanol-air}} = \frac{10^{-3} \times (3.03 - (0.98 / \sqrt{30.445})) \times 300.15^{3/2}}{\sqrt{30.445} \times (1.01325) \times (3.857)^2 \times (1.1845)}$$

$$D_{\text{methanol-air}} = 1.505 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

การคำนวณค่า $k_L a$ และค่า $k_G a$ จากสมการ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ

จากสมการ (3.12) จะได้ว่า

$$k_L a (\text{benzene}) = (1.94 \times 10^{-7} + 5.62 \times 10^{-13} 113693^{1.62}) \left(\frac{1.352 \times 10^{-5}}{9.351 \times 10^{-6}} \right)$$

$$k_L a (\text{benzene}) = 1.262 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

และจากสมการ (3.13) จะได้ว่า

$$k_G a (\text{benzene}) = (3.55 \times 10^{-4} + 3.24 \times 10^{-8} 113693^{0.94}) \left(\frac{9.705 \times 10^{-6}}{1.505 \times 10^{-5}} \right)$$

$$k_G a (\text{benzene}) = 1.410 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

การคำนวณค่า $K_{oL}a$ จากทฤษฎีสองฟิล์ม

$$\frac{1}{K_{oL}a} = \frac{1}{1.262 \times 10^{-4}} + \frac{(8.206 \times 10^{-3})(323.15)}{(0.006850)(1.410 \times 10^{-3})}$$

$$K_{oL}a = 9.540 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

จะเห็นว่าที่ได้จากการทำนายด้วยทฤษฎีสองฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการ ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ จากงานวิจัยนี้

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย จากบ่อเติมอากาศ

จรรย์ บุญกาญจน์¹ และ อัมราภรณ์ แก้วชะภา²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ 0-7428-7050 โทรสาร 0-7421-2896

E-mail: bcharun@ratree.psu.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ 0-7421-2896 โทรสาร 0-7421-2896

บทคัดย่อ

การเติมออกซิเจนเป็นขั้นตอนสำคัญในบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การกวนผิวน้ำเพื่อให้มีการถ่ายโอนของออกซิเจนสู่น้ำเสียส่งผลให้มีการถ่ายโอนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสู่บรรยากาศ ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตโดยตรงแล้ว สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจัดเป็นสารประกอบที่มีส่วนทำให้เกิดไฮโดรคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งจะนำไปสู่การเกิดของตัวออกซิไดซ์สำหรับปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลได้ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปริมาณของโอโซนในบรรยากาศ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวนต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวซึ่งวัดจากการระเหยของเมทานอลและของทุโลอินจากน้ำ ตามลำดับ การทดลองการระเหยของเมทานอลและของทุโลอินจากน้ำทำในถังกวนและใช้ปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 50 L ความเร็วรอบในการกวนอยู่ในช่วง 0 ถึง 470 rpm ความเข้มข้นของเมทานอลและทุโลอินเริ่มต้นมีค่าประมาณ 1000 และ 200 mg L⁻¹ ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นกับความเร็วรอบอย่างมีนัยสำคัญ สมการเอมพิริคัลของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวกับความเร็วยรอบถูกพัฒนาขึ้นจากผลการทดลองและตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ อะซีโตน MEK และ เบนซีน ซึ่งเป็นตัวแทนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำ ปานกลางและสูงตามลำดับ พบว่าสมการเอมพิริคัลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายดังกล่าวได้ดี ในทุกสภาวะที่ตรวจสอบ จึงสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ทำนายอัตราการระเหยของ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายใดๆ จากบ่อเติมอากาศได้

1. บทนำและทฤษฎี

บ่อเติมอากาศ (aeration basin) เป็นหน่วยหลักสำหรับการถ่ายโอนมวลในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม มีหน้าที่เพื่อถ่ายโอนออกซิเจนจากวัฏภาคแก๊ส (อากาศ) สู่วัฏภาคของเหลว (น้ำเสีย) การเติมอากาศอาจทำได้โดยการกวนผิวน้ำอย่างรุนแรงเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ (surface aeration) หรือการใช้วิธีการพ่นอากาศสู่แหล่งน้ำโดยตรง (air jet) ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะทำให้เกิดความปั่นป่วนในแหล่งน้ำในแนวลึกและครอบคลุมบริเวณกว้าง ส่งผลให้การถ่ายโอนของออกซิเจนสู่แหล่งน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามสภาพของความปั่นป่วนที่เกิดจากการเติมอากาศด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้มีการถ่ายโอนมวลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียสู่อากาศได้ดี บ่อเติมอากาศจึงจัดเป็นแหล่งที่มีการปล่อย VOCs สู่บรรยากาศที่สำคัญแหล่งหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสีย [1,2] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบ่อเติมอากาศมักจะให้ความสำคัญกับการถ่ายโอนของออกซิเจนเป็นหลัก [3,4] แม้ว่าจะมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการหาอัตราการระเหยของ VOCs ที่ระเหยจากบ่อเติมอากาศ [2,5] แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับหาอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศที่มีรายงานไว้นั้นถูกพัฒนาบนพื้นฐานของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจน แต่เนื่องจากการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนจากแหล่งน้ำเป็นกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว [6] ดังนั้นการคำนวณหาอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศโดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนพื้นฐานของออกซิเจนอาจจะเหมาะสมสำหรับ VOCs ที่กระบวนการการระเหยจากแหล่งน้ำถูกควบคุมโดยฟิล์มของเหลวเท่านั้น การนำสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนพื้นฐานของออกซิเจนมาประยุกต์ใช้กับ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการระเหยส่วนใหญ่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส หรือนำมาประยุกต์ใช้กับ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการระเหยอยู่ในทั้ง

การระเหยอยู่ในทั้งสองวิภภาคอย่างมีนัยสำคัญ จะทำให้การประมาณปริมาณการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศผิดพลาดได้ การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs จากบ่อเติมอากาศที่สามารถประยุกต์ใช้กับ VOCs ทุกประเภทได้ดี เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้การทำนายการระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศมีความถูกต้องกว่าการทำนายโดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนฐานของออกซิเจน

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาถึงปัจจัยดำเนินการของบ่อกวนเติมอากาศ ได้แก่ ความเร็วรอบของใบกวน (impeller speed) ต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว 2) พัฒนาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวกับปัจจัยดำเนินการของบ่อกวนเติมอากาศ และ 3) ตรวจสอบสมการเอ็มพีริคัล ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ประเภทต่างๆจากบ่อกวนเติมอากาศเทียบกับการทดลอง

1.1 อัตราการระเหยและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

อัตราการระเหยของ VOCs (N_{VOCs}) จากบ่อเติมอากาศสามารถหาค่าได้โดยใช้แนวคิดของทฤษฎีสองฟิล์มในทำนองเดียวกันกับการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดที่มีรายงานไว้ทั่วไป [7] โดยที่อัตราการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำจะเท่ากับผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient, K_{ol}) กับความแตกต่างของความเข้มข้นของ VOCs ระหว่างวิภาคของเหลวกับวิภาคแก๊ส (concentration difference, ΔC) และพื้นที่ของการถ่ายโอนมวล (area, a) แต่เนื่องจากพื้นที่ของการถ่ายโอนมวลจากวิภาคของเหลวสู่วิภาคแก๊สของบ่อกวนเติมอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระดับความปั่นป่วนของวิภาคของเหลวที่เกิดจากการกวนผสมอย่างรุนแรง ดังนั้นเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ใช้สำหรับบ่อเติมอากาศจึงนิยมแสดงในเทอมของผลคูณระหว่าง K_{ol} กับ a ก็คือ $K_{ol} a$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (volumetric mass transfer coefficient) แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในเชิงของความเร็ว (transfer velocity) ที่ใช้ทั่วไปสำหรับระบบเปิดที่ทราบค่าพื้นที่ของการถ่ายโอนมวล สมการที่สำคัญที่อธิบายกระบวนการการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนเติมอากาศบนพื้นฐานของทฤษฎีสองฟิล์มสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$R_{VOCs} = K_{ol} a (\Delta C) \quad (1)$$

เมื่อ R_{VOCs} คืออัตราการระเหยของ VOCs (mol s^{-1}) ΔC คือความแตกต่างของความเข้มข้นของ VOCs (mol m^{-3}) และ $K_{ol} a$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) จากสมการ (1) สำหรับกระบวนการการระเหยของ VOCs จากวิภาคของเหลวในบ่อกวนเติมอากาศสู่วิภาคแก๊ส นั้น ΔC คือความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ VOCs ในวิภาคของเหลวที่วัดค่าได้กับความเข้มข้นของ VOCs ในวิภาคแก๊สที่คำนวณโดยสมมติว่าอยู่ในสมดุลกับบรรยากาศและเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ (Henry's law) ดังนั้นสามารถเขียนเป็น ΔC ได้เป็น

$$\Delta C = C_w - \frac{C_g H}{RT} \quad (2)$$

เมื่อ C_w คือความเข้มข้นของ VOCs ในวิภาคของเหลว (mol m^{-3}) C_g คือความเข้มข้นของ VOCs ในวิภาคแก๊ส (mol m^{-3}) หรือในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ H คือค่าคงที่ของเฮนรี่ ($\text{atm m}^3 \text{mol}^{-1}$) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ($\text{atm}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) โดยปกติแล้วเทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ (2) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมแรก ดังนั้น สมการ (2) ลดรูปเป็น

$$\Delta C \approx C_w \quad (3)$$

และอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนเติมอากาศที่มีปริมาตรคงที่คือ

$$R_{VOCs} = -V \frac{dC_L}{dt} \quad (4)$$

รวมการ (1), (3) และ (4) เข้าด้วยกัน จะได้

$$\frac{dC_L}{dt} = K_{ol} a C_L \quad (5)$$

อินทิเกรต สมการ (5) โดยที่ $C_L = C_{L0}$ เมื่อ $t = 0$ และ $C_L = C_L$ เมื่อ $t = t$ โดย จะได้

$$\ln \frac{C_L}{C_{L0}} = -\frac{K_{ol} a}{V} t \quad (6)$$

ดังนั้น

$$-\frac{K_{ol} a}{V} = S \quad (7)$$

เมื่อ S คือความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \frac{C_L}{C_{L0}}$ กับ t

จากสมการ (7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$K_{\alpha}a = -SV \quad (8)$$

ดังนั้นจากข้อมูลของความเข้มข้นของ VOCs ใน ภูมิภาคของเหลว C_L ที่เวลาต่างๆ t และปริมาตรของของเหลวในบ่อกวนเดิมอากาศ สามารถหาค่า $K_{\alpha}a$ ได้ ตามสมการ (6)-(8) และโดยทฤษฎีสองฟิล์ม $K_{\alpha}a$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{K_{\alpha}a} = \frac{1}{k_La} + \frac{RT}{Hk_Ga} \quad (9)$$

เมื่อ k_Ga คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($m^3 s^{-1}$) k_La คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($m^3 s^{-1}$) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ซึ่งมีค่าเป็น $8.21 \times 10^{-5} \text{ atm } m^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์มีหน่วยเป็น K และ H คือค่าคงที่ของเฮนรี่ มีหน่วยเป็น $\text{atm } m^3 \text{ mol}^{-1}$ สมการที่ (9) สามารถเขียนในเทอมของความต้านทานการถ่ายโอนมวลดังแสดงในสมการ (10)

$$R_{\alpha} = R_L + R_G \quad (10)$$

โดยที่ $R_{\alpha} (= \frac{1}{K_{\alpha}a})$ คือความต้านทานรวมในขณะที่

$$R_L (= \frac{1}{k_La}) \quad \text{และ} \quad R_G (= \frac{1}{k_Ga}) \quad \text{คือความต้านทานของ}$$

ภูมิภาคของเหลวและของภูมิภาคแก๊ส ตามลำดับ โดยการแทนค่า k_Ga และ k_La ในสมการ (9) และ (10) พบว่า สำหรับ VOCs ที่มีค่า H สูง (คือ VOCs ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ) R_L จะสูงกว่า R_G มากๆ กระบวนการระเหยของ VOCs ประเภทนี้จะถูกควบคุมโดยความต้านทานในภูมิภาคของเหลว สมการที่ (9) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{\alpha}a} = \frac{1}{k_La} \quad \text{หรือ} \\ k_La = K_{\alpha}a \quad (11)$$

และสำหรับ VOCs ที่มีค่า H ต่ำ (คือ VOCs ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง) R_G จะสูงกว่า R_L มากๆ กระบวนการระเหยของ VOCs ประเภทนี้จะถูกควบคุมโดยความต้านทานในภูมิภาคแก๊ส สมการที่ (9) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{\alpha}a} = \frac{RT}{Hk_Ga} \quad \text{หรือ} \\ k_Ga = \frac{RTK_{\alpha}a}{H} \quad (12)$$

ดังนั้นโดยการทดลองวัดค่า $K_{\alpha}a$ ของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยความต้านทานในภูมิภาคของเหลว และโดยการทดลองวัดค่า k_La ของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยความต้านทานในภูมิภาคแก๊ส จะสามารถหาค่า k_La และค่า k_Ga ได้ ตามสมการ (11) และสมการ (12) ตามลำดับ

1.2 ตัวเลขเรโนลด์ (Reynold Number)

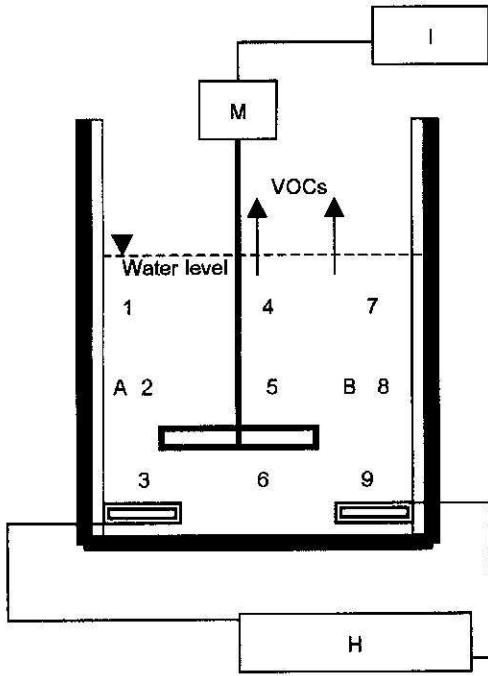
ในการกวนของเหลวสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติของเหลว ขนาดของใบกวน และความเร็วรอบที่ใช้ในการกวนในเทอมของตัวแปรไร้หน่วยที่เรียกว่าตัวเลขเรโนลด์ (Reynold Number, N_{RE} , dimensionless) ได้ ดังสมการ (13)

$$N_{RE} = \frac{ND^2}{\nu} \quad (13)$$

เมื่อ N คือความเร็วรอบ (s^{-1}) D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (m) และ ν คือความหนืดจลน์ของของเหลว ($m^2 s^{-1}$) โดยในการศึกษานี้จะแสดงความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองในเทอมของ N_{RE}

2. อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวน ต่อ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs ทำในถังกวนที่สร้างจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ ถึงกวนที่สร้างขึ้นมีปริมาตร 70 ลิตร อัตราส่วนต่างๆที่ใช้ในการสร้างถังกวนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนมาตรฐานตามหลักการการออกแบบถังกวนโดยทั่วไป [8] และสามารถขยาย (scale up) ให้มีขนาดใหญ่ได้ตามหลักการของการขยายขนาด ขนาดต่างๆของถังกวนจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายในของถังกวน (T) เท่ากับ 45 cm ภายในถังมี baffle จำนวน 4 อัน โดยความกว้างของ baffle (B) เท่ากับ T/12 ใบกวนที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ six flat blade มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (D) เท่ากับ T/3 ใบกวนถูกขับด้วยมอเตอร์ขนาด 1 hp ซึ่งควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ ความสูงของของเหลวในถัง (Z) กำหนดให้เท่ากับ T (Z/T=1) ตำแหน่งของใบกวนในถัง (C) อยู่ที่ระยะ (1/3)Z ขนาดต่างๆของถังกวนที่กำหนดเป็นมาตรฐานจะเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่นักวิจัยอื่นและหรือกับบ่อเดิมอากาศจริงได้ ไดอะแกรมของถังกวนจำลองที่ใช้ในการศึกษาแสดง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงโดยแตรมของถังกวนที่ใช้ศึกษาการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำ 1-9 คือตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ A และ B คือตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างน้ำ M คือมอเตอร์ I คือระบบควบคุมความเร็วรอบ และ H คือระบบให้ความร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เมทานอล อะซีโตน เมทิล เอทิล คีโตน (MEK) เบนซีน และ ทูโลอิน โดยที่เมทานอลและทูโลอินถูกเลือกเพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบในการกวนต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_c a$) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($k_l a$) ตามลำดับ ส่วน อะซีโตน เมทิล เอทิล คีโตน (MEK) และเบนซีน ซึ่งเป็น VOCs ที่มีความต้านทานของวัฏภาคของเหลวในระดับ น้อย ปานกลาง และ สูง ตามลำดับนั้น ถูกเลือกเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอ็มพิริคัลของ $k_c a$ และ $k_l a$

การทดลองเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายของ VOCs ที่ใช้ในการทดลองในน้ำปริมาตร 50 ลิตร ให้ความเข้มข้นตามต้องการ เดิมสารละลายดังกล่าวลงในถังกวนที่ใช้ในการทดลอง ปรับค่าความเร็วรอบของใบกวนตามที่กำหนด เริ่มการทดลองโดยการเปิดใบกวนให้ทำงาน ความเร็วยรอบที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 0-470 rpm ที่เวลาเริ่มต้นของแต่ละการทดลอง ทำการการเก็บตัวอย่างน้ำที่ตำแหน่ง A และ B ดังแสดงในรูปที่ 1 บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ ที่ตำแหน่ง 1-9 และอุณหภูมิของอากาศเหนือผิวน้ำเมื่อเวลาผ่านไปตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ ทำการเก็บตัวอย่างและบันทึกข้อมูลต่างๆเหมือนตอนเริ่มต้น จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดยช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง

และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะการระเหยของ VOCs กล่าวคือ สำหรับ VOCs ที่มีอัตราการระเหยต่ำ (เช่น เมทานอล และ อะซีโตน) การทดลองที่ความเร็วยรอบต่ำๆจะใช้เวลาในการทดลอง ประมาณ 20 ชั่วโมง และช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่างคือทุกๆ 1 ชั่วโมง ทั้งเวลาที่ใช้ในการทดลองและช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่างจะลดลงเมื่อความเร็วยรอบที่ใช้สูงขึ้น สำหรับ VOCs ที่มีอัตราการระเหยสูง (เช่น ทูโลอิน และ เบนซีน) การทดลองที่ความเร็วยรอบสูงๆจะใช้เวลาในการทดลองน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ดังนั้นช่วงระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างจะลดลงมาเป็นระดับนาที

ตัวอย่างน้ำที่เก็บที่เวลาต่างๆตลอดเวลาของแต่ละการทดลองนั้นจะถูกเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของ VOCs ในน้ำภายในวันเดียวกัน การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ VOCs ทำโดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี (Hewlett Packard, Model 5790A) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) คอลัมน์ที่ใช้ยาว 6 ฟุต บรรจุด้วย OV-101 อุณหภูมิของเครื่องตรวจหา (detector) และช่องที่ฉีดตัวอย่าง (Injection port) มีค่าเป็น $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิของห้องอบ (Oven) ของแก๊สโครมาโทกราฟี แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง $60\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับชนิดของ VOCs ที่ต้องการวิเคราะห์ ข้อมูลของความเข้มข้นของ VOCs ที่เวลาต่างๆจะนำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล $K_{O_2} a$, $k_c a$ หรือ $k_l a$ แล้วแต่กรณี

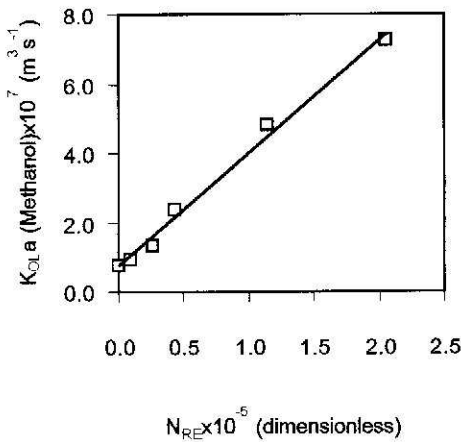
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลของความเร็วยรอบในการกวนต่อ

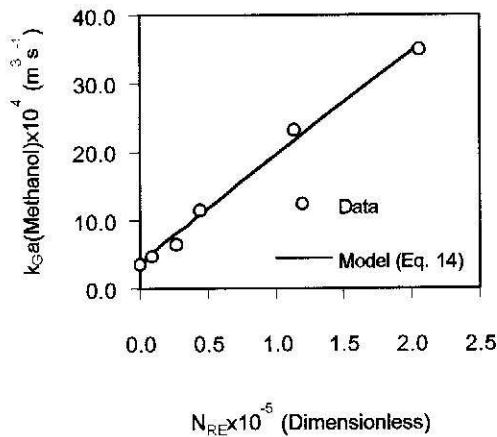
สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $k_c a$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส $k_c a$ ของเมทานอล คำนวณจาก $K_{O_2} a$ ของเมทานอล ตามสมการ (12) โดยที่ $K_{O_2} a$ ของเมทานอลได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างความเข้มข้นของเมทานอลกับเวลาตามสมการ (6) และค่าคงที่ของเฮนรีที่ใช้ในการคำนวณได้จากการตรวจเอกสาร [9] ผลของความเร็วยรอบในการกวนในทอมของ N_{RE} ต่อ $K_{O_2} a$ และ $k_c a$ ของ เมทานอล แสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ พบว่าทั้ง $K_{O_2} a$ และ $k_c a$ แปรผันโดยตรงกับความเร็วยรอบที่เพิ่มขึ้น เพราะความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำที่เกิดจากการกวนทำให้พื้นที่การถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหนาของฟิล์มแก๊สลดลง ในการพัฒนาสมการเอ็มพิริคัลของ $k_c a$ จะเลือกรูปแบบสมการเอ็มพิริคัลในรูปของกฎยกกำลัง (power law) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_c a$ กับ N_{RE} ได้ดังสมการ

$$k_c a = a N_{RE}^b + c$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{O_2,a}$ ของเมทานอลกับ N_{RE} ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{G,a}$ ของเมทานอลกับ N_{RE} ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C

จากการทำ non-linear regression บนชุดข้อมูลของ $k_{G,a}$ กับ N_{RE} ที่แสดงในรูปที่ 3 โดยกำหนดให้ c เป็นค่า $k_{G,a}$ ที่ความเร็วรอบเป็นศูนย์ซึ่งได้จากการทดลอง และมีค่าเท่ากับ $3.55 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ จะได้ค่า a และ b เท่ากับ $3.24 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ และ 0.94 ตามลำดับ ดังนั้นสมการเอ็มพิริคัลของ $k_{G,a}$ ของเมทานอลคือ

$$k_{G,a}(\text{Methanol}) = 3.24 \times 10^{-8} N_{RE}^{0.94} + 3.55 \times 10^{-4} \quad (14)$$

ค่า $k_{G,a}$ ของเมทานอลคำนวณตามสมการ (14) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ดังแสดงด้วยเส้นทึบในรูปที่ 3 สมการเอ็มพิริคัลของ $k_{G,a}$ ที่พัฒนาขึ้นมาจากข้อมูลการระเหยของเมทานอลจากน้ำที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C สามารถปรับแก้ให้ใช้กับ VOCs ใดๆและที่อุณหภูมิอื่นๆได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่ตามทฤษฎีสองฟิล์ม[10] สามารถเขียนสมการเอ็มพิริคัลของ $k_{G,a}$ สำหรับ VOCs ใดๆบนฐานของเมทานอลได้ดังสมการ

$$k_{G,a}(\text{VOCs}) = (3.24 \times 10^{-8} N_{RE}^{0.94} + 3.55 \times 10^{-4}) \left(\frac{D_{\text{VOCs-air}}}{D_{\text{MeOH-air}}} \right) \quad (15)$$

$$\text{สำหรับ } 0 \leq N_{RE} \leq 2.1 \times 10^5$$

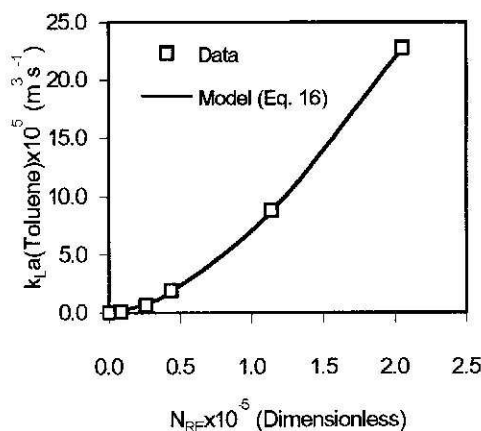
เมื่อ $k_{G,a}(\text{VOCs})$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs (m s^{-1}) $D_{\text{MeOH-air}}$ และ $D_{\text{VOCs-air}}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทานอล และของ VOCs ในวัฏภาคแก๊ส ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) ตามลำดับ สมการ (15) สามารถใช้หาค่า $k_{G,a}$ ของ VOCs ใดๆที่ระเหยจากบ่อกวนเดิมอากาศในช่วงของ N_{RE} ที่กำหนดได้

3.2 ผลของความเร็วยรอบในการกวนต่อ

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $k_L a$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว $k_L a$ ของทุโลอิน มีค่าเท่ากับ $K_{O_2,a}$ ของทุโลอิน ตามสมการ (11) โดยที่ $K_{O_2,a}$ ของทุโลอินได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างความเข้มข้นของทุโลอินกับเวลาตามสมการ (6) ดังนั้น $k_L a$ จึงเป็นค่าที่ได้จากการทดลองโดยตรงโดยไม่ต้องคำนวณจากผลการทดลอง ดังเช่นกรณีของ $k_{G,a}$ ผลของความเร็วยรอบในการกวนในเทอมของ N_{RE} ต่อ $k_L a$ ของทุโลอินแสดงในรูปที่ 4 จากรูปดังกล่าวพบว่า $k_L a$ เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น แต่ลักษณะการเพิ่มขึ้นของ $k_L a$ กับ N_{RE} จะไม่เหมือนกับกรณีของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สกล่าวคือ $k_{G,a}$ ค่อยๆเพิ่มขึ้นตาม N_{RE} ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเกือบเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของ N_{RE} ที่ศึกษา แต่ในกรณีของ $k_L a$ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า $k_L a$ จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยกับ N_{RE} ในช่วงแรกๆ ($N_{RE} < 0.4 \times 10^5$) และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับ N_{RE} เมื่อ N_{RE} มีค่าสูงกว่า 0.4×10^5 ทั้งนี้เพราะชั้นฟิล์มของเหลวอยู่ที่ผิวของเหลว จึงจำเป็นต้องอาศัยแรงเฉือนที่ผิวของเหลวสูงถึงระดับหนึ่งจึงจะสามารถมีผลกระทบต่อชั้นฟิล์มของเหลวได้ การกวนด้วยความเร็วรอบที่ต่ำมากจะมีผลต่อชั้นฟิล์มของเหลวและมีผลการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนน้อยมากดังนั้น $k_L a$ ที่วัดได้จึงมีค่าต่ำและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นกับความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งที่มีการกวนทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวน้ำที่มีผลทำให้ความหนาของ

ชั้นฟิล์มของเหลวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ $k_L a$ ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อผ่านจุดนี้ไป $k_L a$ จะเพิ่มขึ้นอย่างมากกับ N_{RE} ที่เพิ่มขึ้นเป็นเพราะผลร่วมระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวที่ลดลงกับพื้นที่ผิวการถ่ายโอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนของผิวน้ำที่เกิดจากการกวน จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า $k_L a$ เพิ่มขึ้นตาม N_{RE} ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ N_{RE} มีค่าสูงกว่า 0.4×10^5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ ของทูลูอีนกับ N_{RE} ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27°C

ในการพัฒนาสมการเอมพิริคัลของ $k_L a$ ดำเนินการในทำนองเดียวกันกับกรณีของ $k_c a$ ที่ได้กล่าวผ่านไปซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ กับ N_{RE} ได้ดังสมการ

$$k_L a = a N_{RE}^b + c$$

เมื่อ a , b และ c คือค่าคงที่ โดยการทำให้ non-linear regression บนชุดข้อมูลของ $k_L a$ กับ N_{RE} ที่แสดงในรูปที่ 4 โดยกำหนดให้ c เป็นค่า $k_L a$ ที่ความเร็วรอบเป็นศูนย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ จะได้ค่า a และ b เท่ากับ 5.62×10^{-13} และ 1.62 ตามลำดับ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลของ $k_L a$ ของทูลูอีนคือ

$$k_L a(\text{Toluene}) = 5.62 \times 10^{-13} N_{RE}^{1.62} + 1.94 \times 10^{-7} \quad (16)$$

สมการเอมพิริคัลของ $k_L a$ ตามสมการ (16) แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ดังแสดงด้วยเส้นทึบในรูปที่ 4 ในทำนองเดียวกันกับกรณีของ $k_c a$ สมการเอมพิริคัลของ $k_L a$ ที่พัฒนาขึ้นมาจากข้อมูลการระเหยของทูลูอีนจาก

น้ำที่อุณหภูมิ 27°C สามารถปรับแก้ให้ใช้กับ VOCs ใดๆและที่อุณหภูมิอื่นๆได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่ สามารถเขียนสมการเอมพิริคัลของ $k_L a$ สำหรับ VOCs ใดๆบนฐานของทูลูอีนได้ดังสมการ (17)

$$k_L a(\text{VOCs}) = (5.61 \times 10^{-13} N_{RE}^{1.62} + 1.94 \times 10^{-7}) \left(\frac{D_{\text{VOCs-water}}}{D_{\text{Toluene-water}}} \right) \quad (17)$$

$$\text{สำหรับ } 0 \leq N_{RE} \leq 2.1 \times 10^5$$

เมื่อ $k_L a(\text{VOCs})$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) $D_{\text{Toluene-water}}$ และ $D_{\text{VOCs-water}}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของทูลูอีน และของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) ตามลำดับ สมการ (17) สามารถใช้หาค่า $k_L a$ ของ VOCs ใดๆที่ระเหยจากบ่อกวนเดิมอากาศในช่วง N_{RE} ที่กำหนดได้

3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม, $K_{OL} a$

ในการคำนวณอัตราการระเหยของ VOCs ตามสมการ (1) จำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม $K_{OL} a$ และความแตกต่างของความเข้มข้น ΔC สำหรับ ΔC นั้นสามารถประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลว C_L ซึ่งสามารถวัดค่าได้โดยตรงใช้แก๊สโครมาโทกราฟีหรือใช้เทคนิคอื่นที่เหมาะสม ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วการหาค่า ΔC สามารถทำได้โดยไม่ยาก ปัญหาของการคำนวณอัตราการระเหยของ VOCs จึงอยู่ที่การหาค่า $K_{OL} a$ ซึ่งจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยการดำเนินการของระบบและประเภทของ VOCs ในทางปฏิบัติการวัดค่า $K_{OL} a$ โดยตรงจึงทำได้ยากและไม่นิยมกระทำแต่จะคำนวณค่า $K_{OL} a$ ของ VOCs ใดๆได้จากสมการของ $k_L a$ และ $k_c a$ ตามสมการ (9) โดยต้องทราบค่า $k_c a$, $k_L a$ และค่า H ของ VOCs ที่สภาวะนั้นๆ ในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณ $K_{OL} a$ ของ VOCs 3 ชนิด คือ อะซีโตน MEK และ เบนซีน โดยใช้สมการ $k_c a$ และ $k_L a$ ดังแสดงด้วยสมการ (15) และสมการ (17) ตามลำดับ และค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับ VOCs ต่างๆที่ต้องใช้ในการคำนวณ $K_{OL} a$ ได้จากการตรวจเอกสาร [9] จากนั้นจึงเปรียบเทียบ $K_{OL} a$ ที่ได้จากการคำนวณกับ $K_{OL} a$ ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่างๆ สมบัติของ VOCs ที่ใช้ในการคำนวณ $k_c a$, $k_L a$ และ $K_{OL} a$ ของอะซีโตน MEK และ เบนซีน ที่สภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ผลการคำนวณ $K_{OL} a$ ของ อะซีโตน MEK และ เบนซีน ที่สภาวะต่างๆแสดงเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 9 ซึ่งจะพบว่า $K_{OL} a$ ของอะซีโตน MEK และ เบนซีน ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดลองในทุกกรณีที่ทดสอบ แสดงว่าสม

การเอมพิริคัลของ k_{ca} และ k_{La} ที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัยนี้มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้ในการหาค่า K_{La} ของ อะซีโตน MEK และ เบนซีน จากบ่อกวรมเติมอากาศได้ และเนื่องจาก อะซีโตน MEK และ เบนซีน เป็นตัวแทนของ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการระเหยในวัฏภาคของเหลวในระดับน้อย ปานกลาง และสูง ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าสมการเอมพิริคัลของ k_{ca} และ k_{La} ที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัยนี้ สามารถใช้ได้กับ VOCs ทุกชนิด คือ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลว และ VOCs ที่ทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวมีผลต่อการระเหย ซึ่งแทนด้วย อะซีโตน เบนซีน และ MEK ตามลำดับ

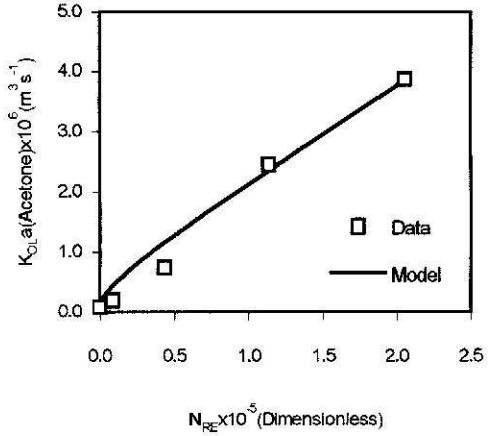
นอกจากนี้แล้วการปรับแก้ k_{ca} และ k_{La} ที่อยู่บนฐานของเมทานอลและโทลูอีน ตามลำดับ ให้เป็นค่า k_{ca} และ k_{La} ของ อะซีโตน เบนซีน และ MEK โดยใช้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ยกกำลังหนึ่งในการศึกษาแล้วให้ผลการทำนาย K_{La} ของ อะซีโตน เบนซีน และ MEK สอดคล้องกับผลการทดลอง เป็นสิ่งยืนยันได้ว่ากระบวนการการระเหยของ VOCs จากถังกวนยังคงสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสองฟิล์ม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ VOCs สำหรับการคำนวณ K_{La} c ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 27 °C

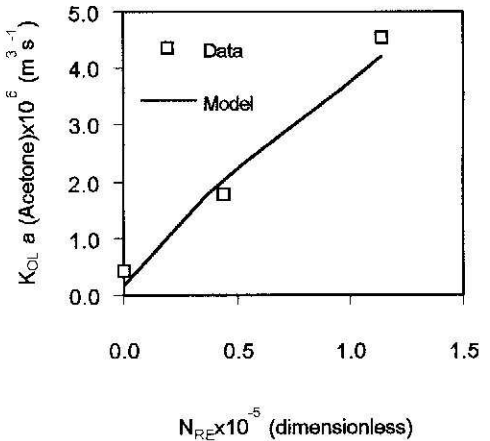
Compound	H (atm m ³ mol ⁻¹)	D _{voc-air} (cm ² s ⁻¹)	D _{voc-water} (cm ² s ⁻¹)
Methanol	5.11x10 ⁻⁶	0.151	1.74x10 ⁻⁵
Acetone	3.69x10 ⁻⁵	0.111	1.21x10 ⁻⁵
MEK	5.59x10 ⁻⁵	0.097	1.04x10 ⁻⁵
Benzene	6.85x10 ⁻³	0.097	1.06x10 ⁻⁵
Toluene	7.29x10 ⁻³	0.087	9.35x10 ⁻⁶

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของ VOCs สำหรับการคำนวณ K_{La} c ที่อุณหภูมิของแหล่งน้ำเท่ากับ 40 °C

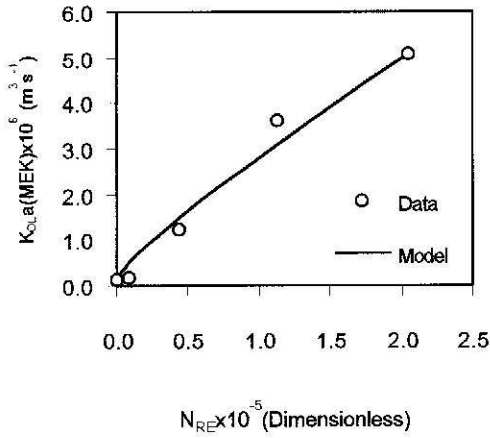
Compound	H (atm m ³ mol ⁻¹)	D _{voc-air} (cm ² s ⁻¹)	D _{voc-water} (cm ² s ⁻¹)
Methanol	1.05x10 ⁻⁵	0.163	1.81x10 ⁻⁵
Acetone	6.98x10 ⁻⁵	0.120	1.27x10 ⁻⁵
Benzene	1.21x10 ⁻²	0.105	1.41x10 ⁻⁵
Toluene	1.27x10 ⁻²	0.095	9.76x10 ⁻⁶



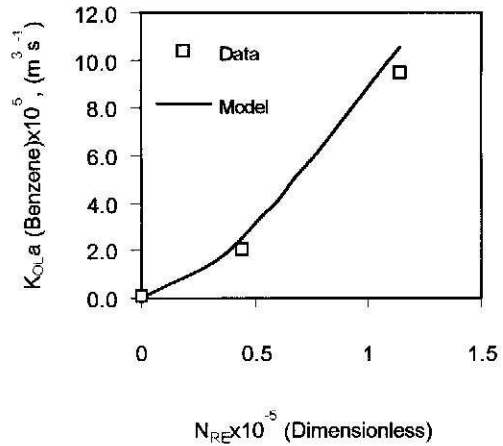
รูปที่ 5 เปรียบเทียบ K_{La} จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณสำหรับการระเหยของอะซีโตนจากน้ำที่ความเร็วรอบต่างๆที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C



รูปที่ 6 เปรียบเทียบ K_{La} จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณสำหรับการระเหยของอะซีโตนจากน้ำที่ความเร็วรอบต่างๆที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 40 °C



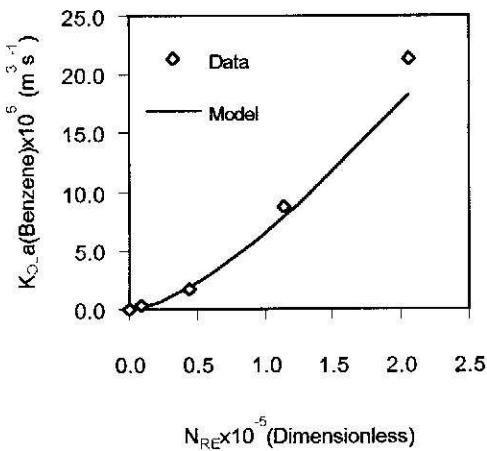
รูปที่ 7 เปรียบเทียบ K_{OLa} จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณสำหรับการระเหยของ MEK จากน้ำที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C



รูปที่ 9 เปรียบเทียบ K_{OLa} จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณสำหรับการระเหยของ เบนซีนจากน้ำที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 40 °C

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวน (ที่แสดงในเทอมของ N_{RE}) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs แต่ละชนิดโดยอิสระต่อกัน โดย VOCs ที่ศึกษาประกอบด้วย เมทานอล อะซีโตน เมทิล เอทิล คีโตน (MEK) เบนซีน และ ทุโลอิน เมทานอลและทุโลอินถูกเลือกเพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวนต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส $k_{c,a}$ และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว $k_{l,a}$ ตามลำดับ ข้อมูลการทดลองถูกพัฒนาเป็นสมการเอมพิริคัลของ $k_{c,a}$ และ $k_{l,a}$ บนฐานของเมทานอลและทุโลอิน ตามลำดับ เมื่อปรับแก้สมการดังกล่าวด้วยสัมประสิทธิ์การแพร่ พบว่าสมการเอมพิริคัลของ $k_{c,a}$ และ $k_{l,a}$ ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนาย K_{OLa} ของ อะซีโตน เบนซีน และ MEK ซึ่งเป็นตัวแทนของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลว และ VOCs ที่ทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวมีผลต่อการระเหยได้ดี สามารถสรุปได้ว่าสมการเอมพิริคัลของ $k_{c,a}$ และ $k_{l,a}$ ที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัยนี้สามารถใช้คำนวณ K_{OLa} ของ VOCs ทุกชนิดได้ และการที่ $k_{c,a}$ และ $k_{l,a}$ แปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นสิ่งยืนยันว่ากระบวนการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำในถังกวนที่ศึกษาสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสองฟิล์ม



รูปที่ 8 เปรียบเทียบ K_{OLa} จากการทดลองกับค่าจากการคำนวณสำหรับการระเหยของ เบนซีนจากน้ำที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 27 °C

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปี 2544 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาปริญญาโท และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่และให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือวิเคราะห์ สาธารณูปโภค งานงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Tchobanoglous and F. Burton: "Volatilization and Gas Stripping of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wastewater Management Facilities" in Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse., McGraw-Hill, Inc, Third edition, pp.287-293, 1991
- [2] J. Chern and C. Yu: "Volatile Organic Compound Emission from Diffused Aeration Systems: Experiment and Modeling", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 38, No. 5, pp.2156-2159, 1999
- [3] J. Chern and C. Yu: "Oxygen Transfer Modeling of Diffused Aeration Systems", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 36, No. 12, pp. 5447-5453, 1997
- [4] S.H. Lin, T. M. Lin, and H.G. Leu; Determination of Oxygen Diffusion Coefficient in Wastewaters", Journal of Environmental Engineering. March, pp.265-271, 1998
- [5] P.V. Robert, C. Munz and P. Dandliker: " Modeling Volatile Organic Solute Removal by Surface and Bubble Aeration" Journal WPCF, Vol. 56, No. 2, pp.157-163, 1984
- [6] P.S. Liss: " Processes of Gas Exchange Across an Air-Water Interface", Deep-Sea Research, Vol. 20, pp. 221-238, 1973
- [7] C. Bunyakan, P. Tongsoi and C. Tongurai: " Film Mass Transfer Coefficient for Prediction of Volatile Organic Compound Evaporation Rate from Open Water Basin", Songklanakrin J. Sci. Technol., Vol. 23, No. 4. Pp. 563-577, 2001
- [8] R.S. Brodkey and H.C. Hershey: " Agitation" in Transport Phenomena A Unified Approach, McGraw-Hill Book Company, pp. 359-398, 1981

- [9] J. Staudinger and P.V. Robert: " A Critical Review of Henry's Law Constants for Environmental Application", Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. Vol. 26, pp. 205-297, 1996
- [10] W.G. Whitman. Chem. Metall. Engng. Vol.29. pp.146, 1923

ประวัติผู้วิจัย

1. นาย จรรย์ บุญกาญจน์

วันเดือนปีเกิด 21 ธันวาคม 2509
วุฒิการศึกษา Ph.D. (Chemical Engineering) , Vanderbilt University, USA
ตำแหน่ง อาจารย์ ระดับ 7
สถานที่ทำงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112
โทร 0-7428-7050, 0-7421-2896