

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันนี้จะพบว่ามีการนำสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) มาใช้กันอย่างแพร่หลายในแทบทุกประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต สารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายที่เหลือใช้จากกระบวนการส่วนหนึ่งจะปนเปื้อนกับน้ำใช้ในกระบวนการและในที่สุดก็จะถ่ายโอนไปสู่บ่อเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งในบ่อเติมอากาศดังกล่าวจะมีการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องโดยใช้ชุดกวนขนาดใหญ่ทำให้เกิดความปั่นป่วนในชั้นของน้ำและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งถ้าในน้ำมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายปนอยู่ก็จะสามารถระเหยจากน้ำไปสู่บรรยากาศได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศตามมาได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน (Chem and Yu, 1999; Matter-Müller et al., 1981; Chem and Yu, 1995; Peng et al., 1995) โดยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้เป็นตัวทำละลายในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปได้แก่ โทลูอิน(toluene) ไซลีน(xylene) เบนซีน(benzene) คลอโรฟอร์ม(chloroform) อะซิโตน(acetone) เมทิล เอทิล คีโตน(methyl ethyl ketone) และเมทานอล(methanol) เป็นต้น

กระบวนการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นในแหล่งน้ำและบรรยากาศ ปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมให้ VOCs ถ่ายโอนจากแหล่งน้ำสู่บรรยากาศได้รวดเร็วขึ้น ได้แก่ อุณหภูมิของแหล่งน้ำ (จรัญ และคณะ, 2542) อุณหภูมิของอากาศ ความเร็วลมที่พัดผ่านผิวน้ำ (Bunyakan et al., 2001; จรัญ และคณะ, 2544) และความปั่นป่วนในชั้นน้ำ (Dewulf et al., 1998) ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบุปริมาณของ VOCs ที่ระเหยสู่บรรยากาศได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาวิธีการสำหรับการประมาณการระเหยของ VOCs โดยคำนึงถึงอิทธิพลของความปั่นป่วนในชั้นน้ำและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นปัจจัยหลัก วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้คือ การคำนวณค่าฟลักซ์การระเหยของ VOCs (N_{VOCs}) จากแหล่งน้ำเปิดโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (two film theory)

ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำเปิดเป็นครั้งแรกโดย Liss and Slater (1974) จากทฤษฎีนี้ฟลักซ์ของ VOCs ที่ถ่ายโอนผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศสู่สิ่งแวดล้อมจะมีความสัมพันธ์อยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวิภาคของเหลว (overall mass transfer coefficient, K_{OL}) ซึ่งค่า K_{OL} จะเป็นฟังก์ชันอยู่กับสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (liquid film coefficient, k_L) สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (gas film coefficient, k_G) และค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's constant, H) ดังนั้นค่า k_L และ k_G ของ VOCs จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องใช้ในการหาค่าฟลักซ์ของ VOCs

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า k_L และ k_G ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระบบที่พิจารณา เช่น กรณีของการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด ค่า k_L และ k_G จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมเหนือผิวน้ำ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นหลัก (Bunyakana et al., 2001) สำหรับในกรณีของบ่อเติมอากาศ (aeration basin) ค่า k_L และ k_G จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการกวนเติมอากาศ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ดังนั้นการที่จะทำนายฟลักซ์การระเหยของ VOCs จากบ่อเติมอากาศได้จึงจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับตัวแปรเหล่านี้

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวนเติมอากาศ ผลของอุณหภูมิและผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_{Ga} และ k_{La}) โดยทำการทดลองในบ่อกวนจำลอง ผลการทดลองถูกนำมาพัฒนาเป็นสมการเอมพิริคัล เพื่อใช้ทำนายอัตราการระเหยของ VOCs จากบ่อกวนหรือบ่อเติมอากาศโดยการกวนโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม

ตรวจเอกสาร

1. ทฤษฎีสองฟิล์มและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

กระบวนการระเหยเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลของสารจากแหล่งน้ำผ่านผิวสัมผัสระหว่างแหล่งน้ำและอากาศ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มของ Whitman (1924) โดยสมมุติว่า วิภาคของเหลวซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและแยกจากวิภาคอากาศโดยชั้น

ฟิล์มบางๆของของเหลวและของอากาศ การถ่ายโอนมวลเกิดจากการแพร่ของโมเลกุลข้ามผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองและสมมุติว่าที่ผิวสัมผัสอยู่ในสถานะคงตัว

สำหรับกระบวนการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) จากแหล่งน้ำ อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลาใดๆ (R_{VOCs}) สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มดังสมการ

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

เมื่อ $R_{VOCs,t}$ = อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลา t , mol s^{-1}

K_{OL} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว, m s^{-1}

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t , mol m^{-3}

$C_{G,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคแก๊สที่เวลา t , mol m^{-3}

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

R = ค่าคงที่สากลแก๊ส (Universal gas constant),
 $\text{atm m}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

a = พื้นที่ของการระเหย, m^2

เนื่องจากพื้นที่ของการระเหย a ระหว่างการกวนเดิมอากาศวัดได้ยากและแปรเปลี่ยนได้ตามลักษณะการกวนจึงนิยมเขียนเป็นกลุ่มพารามิเตอร์ (lumped parameter) อยู่ร่วมกับ K_{OL} เป็น $K_{OL}a$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (volumetric mass transfer coefficient)

จากทฤษฎีสองฟิล์ม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับแหล่งน้ำ ($K_{OL}a$) มีความสัมพันธ์อยู่กับสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_Ga) และค่าคงที่ของเฮนรี่ (H) ดังสมการ

$$\frac{1}{K_{OL}a} = \frac{1}{k_La} + \frac{RT}{Hk_Ga} \quad (1.2)$$

- เมื่อ $K_{OL}a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม, $m^3 s^{-1}$
 k_La = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $m^3 s^{-1}$
 k_Ga = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 s^{-1}$
 H = ค่าคงที่เฮนรี่, $atm m^3 mol^{-1}$
 R = ค่าคงที่สากลแก๊ส, $atm m^3 mol^{-1} K^{-1}$
 T = อุณหภูมิของน้ำ, K

สำหรับบ่อเติมอากาศซึ่งเปิดสู่บรรยากาศนั้นโดยทั่วไปแล้วพบว่าความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคแก๊ส (C_G) จะมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว ($C_G \ll C_L$) ดังนั้นสมการที่ (1.1) จะลดรูปเป็น

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

- เมื่อ $R_{VOCs,t}$ = อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลา t , $mol s^{-1}$
 $K_{OL}a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว, $m^3 s^{-1}$
 $C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t , $mol m^{-3}$
 อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลาใดๆ $R_{VOCs,t}$ สำหรับกระบวนการระเหยของ VOCs ที่ปริมาตรของสารละลายสามารถสมมุติได้ว่ามีค่าคงที่ตลอดกระบวนการระเหย (เช่นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรรวม) สามารถหาได้จากการทำดุลมวลรอบบ่อเติมอากาศจะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{VOCs,t}$, พื้นที่ผิวของการระเหย, ปริมาตรของสารละลาย, ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว และเวลาใดๆ ดังสมการ

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

- เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลาย, m^3
 t = เวลาที่ใช้, s

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t , mol m^{-3}

รวมสมการ(1.3) และ (1.4) จะได้

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

อินทิเกรตสมการ (1.5) จากเวลาเท่ากับศูนย์ ที่ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวเท่ากับ $C_{L,0}$ ถึงเวลา t ใดๆ ที่ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวเท่ากับ $C_{L,t}$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลาใดๆดังสมการ

$$\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,0}} = -\frac{K_{OL}a}{V}t \quad (1.6)$$

จากสมการ (1.6) จะพบว่าสามารถหาค่า $K_{OL}a$ ของแต่ละการทดลองที่สภาวะต่างๆ ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,0}}$ กับ t ของการทดลองนั้นๆและค่า $K_{OL}a$ คือ

$$K_{OL}a = -\text{slope } V \quad (1.7)$$

เมื่อทราบค่า $K_{OL}a$ อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลาใดๆที่สนใจสามารถหาได้จากผลคูณของค่า $K_{OL}a$ กับความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวในขณะนั้นตามสมการ (1.3)

2. การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_Ga)

2.1 สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La)สามารถหาได้จากกระบวนการการระเหยของ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลว VOCs เหล่านี้จะมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำซึ่งก็คือ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง เมื่อ H มีค่าสูงๆเทอมขวามือสุดของสมการ (1.2) จะสามารถประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการ (1.2) สามารถลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{oa}} = \frac{1}{k_{la}} \quad (1.8)$$

จากสมการ (1.8) ทำให้สามารถหาค่า k_{la} ได้จากการวัด K_{oa} ของ VOC ที่มีค่า H สูงๆ Mackay (1989) พบว่า VOCs ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงกว่าหรือเท่ากับ $5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ โดย ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลของ VOCs กลุ่มนี้จะอยู่ในวิฤภาคของของเหลวมากกว่า 90 % ขึ้นไป ตัวอย่างของ VOCs ในกลุ่มนี้ได้แก่ โทลูอิน และ เบนซีน ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรี่ที่ 25°C เป็น 6.64×10^{-3} และ $5.5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้จะเลือกวัด k_{la} จากการระเหยของโทลูอินจากแหล่งน้ำ เพราะเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

2.2 สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_{ga})

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_{ga}) สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์ทั้งนี้เพราะในกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จะไม่มีเกรเดียนต์ของความเข้มข้นเกิดขึ้นจึงไม่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวิฤภาคของเหลว ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จะอยู่ในวิฤภาคแก๊สทั้งหมด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการทดลองการระเหยของสารบริสุทธิ์ในถังกวนขนาดใหญ่ไม่สามารถกระทำได้จึงต้องศึกษาหา k_{ga} จากการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ระเหยได้จากวิฤภาคของเหลวแทน โดยใช้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ซึ่งเป็นสารที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำๆ เมื่อ H มีค่าต่ำมากๆ เทอมขวามือสุดของสมการ (1.2) จะมีค่าสูงกว่าเทอมแรกมากๆ ดังนั้นสมการ (1.2) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{oa}} = \frac{RT}{Hk_{ga}}$$

หรือ

$$k_{ga} = \frac{RTK_{oa}}{H} \quad (1.9)$$

จากสมการ (1.9) ทำให้สามารถวัดค่า k_{Ga} ได้จากการวัด K_{OLa} จากกระบวนการระเหยของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำๆ Mackay (1989) พบว่าสารที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ สารที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำกว่าหรือเท่ากับ $5 \times 10^6 \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลของ VOCs กลุ่มนี้จะอยู่ในวัฏภาคแก๊สมากกว่า 90% ขึ้นไป ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ได้แก่ เมทานอล ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรีที่ 25°C เป็น $3.77 \times 10^6 \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ดังนั้นการศึกษานี้จะเลือกวัด k_{Ga} จากกระบวนการระเหยของเมทานอลจากวัฏภาคของเหลวเพราะเมทานอลเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

สำหรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีอยู่ระหว่าง $5 \times 10^6 - 5 \times 10^3 \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลจะมีอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจะสามารถวัดได้เฉพาะ K_{OLa} เท่านั้นโดยจะไม่สามารถวัด k_{Ga} และ k_{La} ของ VOCs ในกลุ่มนี้ได้เลย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีวิธีที่ใช้ทำนายหรือประมาณ k_{Ga} และ k_{La} สำหรับ VOCs เหล่านี้ได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติที่สำคัญๆ ของสาร เช่น น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion Coefficient) เป็นตัวปรับแก้ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3. สมการของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

สมการของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_L และ k_G) มีรายงานไว้ในสองรูปแบบ คือ แบบจำลองตามแนวความคิด และแบบจำลองที่เป็นสมการเอ็มพิริคัล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการทดลอง

3.1 แบบจำลองตามแนวความคิด (Conceptual model)

แบบจำลองตามแนวความคิด จัดเป็นความพยายามแรกๆ ที่จะอธิบายให้เห็นถึงภาพพจน์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ซึ่งแบบจำลองตามแนวความคิดประกอบด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงผิว ทฤษฎีชั้นขอบเขต และทฤษฎีการทะลุทะลวง

3.1.1 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film model)

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

$$k_g = \frac{D_g}{\delta_g}$$

และ

$$k_l = \frac{D_l}{\delta_l} \quad (1.10)$$

เมื่อ k_g, k_l = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวตามลำดับ, m s^{-1}

D_g, D_l = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลวตามลำดับ, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

δ = ความหนาของฟิล์ม, m

ทฤษฎีสองฟิล์ม ทำนายว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของสารประกอบ อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับลักษณะของสิ่งแวดล้อม อย่างเช่น ความเร็วลม ความหนืด ความหนาแน่นและอุณหภูมิของเหลวซึ่งจะมีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม

Chem and Yu (1999) ได้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในกระบวนการระเหยของ VOCs จากระบบบำบัดน้ำเสียจำลองโดยใช้ถังเติมอากาศขนาด 500 ลิตร ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.83 เมตร และสูง 1.2 เมตร จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยทฤษฎีสองฟิล์มและ ASCE-based model (American Society of Civil) พบว่าการทำนายด้วยทฤษฎีสองฟิล์มให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ ASCE-based model ให้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

3.1.2 ทฤษฎีการทะลุทะลวง (Penetration theory)

Herbie (1935) เป็นคนแรกที่เสนอทฤษฎีนี้ขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายอัตราชั่วครู่ของการแพร่เข้าสู่ของไหลที่ค่อนข้างหนาซึ่งความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสคงที่โดยสมมุติว่ามีกระแสนวนจากของไหลบัลค์เข้ามายังบริเวณผิวสัมผัส โดยโมเลกุลที่แพร่จะเคลื่อนที่ไปไม่ถึงอีกด้านของชั้นบางๆ หากเวลาสัมผัสสั้นที่สภาวะไม่คงตัว จะได้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลดังสมการ (1.11) ซึ่งทฤษฎีนี้ทำนายว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่

$$k = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \quad (1.11)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล, m s^{-1}
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
 t = เวลาการสัมผัสเฉลี่ย, s

3.1.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนผิว (Surface Renewal theory)

ทฤษฎีการเปลี่ยนผิวปรับปรุงมาจากทฤษฎีการทะลุทะลวงโดย Danckwerts (1951) ซึ่งจะพิจารณาในกรณีที่ชิ้นส่วนของของไหล (fluid element) ที่ผิวถูกแทนที่ด้วยของไหลใหม่จากกระแสนบัลค์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแสดงดังสมการ (1.12) ทฤษฎีนี้ทำนายว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล ถึงแม้ว่าในทางกายภาพทฤษฎีนี้จะใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากกว่าทฤษฎีสองฟิล์ม แต่ก็ไม่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง

$$k = \sqrt{D\tau} \quad (1.12)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล, m s^{-1}
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

τ = average residence time for an element in the interface , s

3.1.4 ทฤษฎีชั้นขอบเขต (Boundary layer theory)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากทฤษฎีชั้นขอบเขตจะคล้ายคลึงกับการศึกษาในเรื่องกลศาสตร์ของไหล และการถ่ายโอนความร้อนผ่านแผ่นเพลทบางๆ (flat plate) นั่นคือเมื่อขอบเขตอยู่ในช่วงลามินาร์ซึ่งมีเลข Reynold น้อยกว่า 3×10^5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลหาได้จากสมการ

$$\frac{kL}{D} = 0.626 \text{ Re}^{1/2} \text{ Sc}^{1/3} \quad (1.13)$$

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

$$\frac{kL}{D} = 0.373 \text{ Sc}^{1/3} (\text{Re}^{0.8} - 15500) \quad (1.14)$$

- เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล , m s^{-1}
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล , $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
 L = ความยาวของเพลทบาง , m
 Re = เลข Renolds (ไม่มีหน่วย)
 Sc = เลข Schmidt (ไม่มีหน่วย)

Bunyakan (1998) พบว่าความสัมพันธ์เหล่านี้ทำนาย k_L และ k_G ผิดพลาดมากเมื่อประยุกต์ใช้กับการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด เพราะว่สมการเหล่านี้พัฒนาขึ้นมาจากการสมมุติให้การถ่ายโอนมวลเกิดบนวัสดุผิวเรียบ

3.2 แบบจำลองสมการเอ็มพริกัล

ถึงแม้ว่าแบบจำลองตามแนวความคิดได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เข้าใจการถ่ายโอนมวลที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค แต่โดยทั่วไปแล้วไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานจริง เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง ในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ใช้กันส่วนมากอยู่ในรูปของสมการเอ็มพริกัล (Harbeck, 1962; Mackay and Yeun, 1983; Schwarzenback et al., 1998; Lunney et al., 1985)

4. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติของโมเลกุล

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับน้ำหนักโมเลกุล

กฎการแพร่ของแกรแฮม (Graham's law of diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุลดังสมการ (Rathbun and Tai, 1983)

$$k = bM^{-0.5} \quad (1.15)$$

จากสมการ (1.15) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a}$ และ $k_{G,a}$ กับน้ำหนักโมเลกุลของ VOCs ใดๆ ได้ดังนี้

$$k_{L,a} = b_L M^{-0.5} \quad (1.16)$$

และ $k_{G,a} = b_G M^{-0.5} \quad (1.17)$

เมื่อ $k_{L,a}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $m^3 s^{-1}$

$k_{G,a}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 s^{-1}$

b_L, b_G = ค่าคงที่

M = น้ำหนักโมเลกุล, $g mol^{-1}$

สมการ (1.16) ถึง (1.17) ทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} และ k_{Ga} ของ VOCs ใดๆที่ต้องการหาค่ากับ k_{La} และ k_{Ga} ของอีก VOC หนึ่งที่ใช้เป็นสารอ้างอิงได้ดังสมการ (1.18) ถึงสมการ (1.19)

$$k_{La}(VOC) = k_{La}(VOC,ref) \left(\frac{M_{VOC,ref}}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.18)$$

$$k_{Ga}(VOC) = k_{Ga}(VOC,ref) \left(\frac{M_{VOC,ref}}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.19)$$

เมื่อ	$k_{La}(VOC)$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC , $m^3 s^{-1}$
	$k_{Ga}(VOC)$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC , $m^3 s^{-1}$
	$k_{La}(VOC,ref)$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง , $m^3 s^{-1}$
	$k_{Ga}(VOC,ref)$	= สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง , $m^3 s^{-1}$
	$M_{VOC,ref}$	= น้ำหนักโมเลกุลของ VOC อ้างอิง , $g \text{ mol}^{-1}$
	M_{VOC}	= น้ำหนักโมเลกุลของ VOC , $g \text{ mol}^{-1}$

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่

โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลถูกสมมุติให้แปรเปลี่ยนกับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังสมการ

$$k = aD^n \quad (1.20)$$

เมื่อ	k	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสาร , $m s^{-1}$
	a	= ค่าคงที่
	D	= สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) , $m^2 s^{-1}$

n = สัมประสิทธิ์ (coefficient)

โดยค่าของ n ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้ คือ ตามแบบจำลองสองฟิล์ม (two-film model) ของ Lewis and Whitman (1924) ค่า n จะเท่ากับ 1.0 ตามแบบจำลองการทะลุทะลวง (Penetration model) ของ Danckwerts (1951) ค่า n จะเท่ากับ 0.5 และแบบจำลอง ฟิล์ม-การทะลุทะลวง (film-penetration) ของ Dobbins (1964) กำหนดให้ค่า n ขึ้นอยู่กับสถานะของการผสมโดยค่า n จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 สำหรับการผสมที่ดี (high mixing conditions) ถึง $n = 1.0$ สำหรับสถานะที่มีการผสมต่ำ (low mixing) จากหลักการของความเหมือนระหว่างการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer-mass transfer analogy) ของ Sherwood and Pigford (1952) จะได้ค่า n เท่ากับ 0.667 ในขณะที่ข้อมูลที่รวบรวมโดย Merchuk (1978) พบว่า n จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1.0 และจากการทดลองจริงของ Merchuk (1952) เองพบว่า ข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองดีที่สุดเมื่อ $n = 0.684$ แต่อย่างไรก็ตาม $n = 0.684$ นี้เหมาะสำหรับการระเหยของของเหลวบริสุทธิ์ซึ่งมีการเคลื่อนไหวของบัคส์มาก สำหรับการระเหยของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งพบในสิ่งแวดล้อมนั้น Tamir และคณะ (1979) แนะนำว่าค่า n ที่เหมาะสมควรจะเป็น 0.632 ในขณะที่ Gilland and Sherwood ทำการทดลองการระเหยของของเหลว 9 ชนิด ใน wet-wall column โดยให้อากาศไหลแบบปั่นป่วน ได้ค่า $n = 0.56$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่พบโดย Dewulf et al. (1998) ซึ่งพบว่าค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบโดยอยู่ในช่วง 0.50-0.65 ในขณะที่ Rathbun and Tai (1983) พบว่าค่า $n = 0.568$ ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (1.20) จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ใดๆ ได้ดังนี้

$$k_L a = a_L D_L^n \quad (1.21)$$

และ $k_G a = a_G D_G^n \quad (1.22)$

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

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

a_L, a_G = ค่าคงที่

D_L = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของเหลว, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

D_G = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคแก๊ส, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

สมการ (1.21) ถึงสมการ (1.22) ทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} และ k_{Ga} ของ VOCs ใดๆที่ต้องการหาค่ากับ k_{La} และ k_{Ga} ของอีก VOC หนึ่งที่ใช้เป็นสารอ้างอิงได้ ดังสมการ (1.23) ถึงสมการ (1.24)

$$k_{La}(\text{VOC}) = k_{La}(\text{VOC}, \text{ref}) \left(\frac{D_{\text{VOC}-\text{liquid}}}{D_{\text{VOC}, \text{ref}-\text{Liquid}}} \right)^n \quad (1.23)$$

$$k_{Ga}(\text{VOC}) = k_{Ga}(\text{VOC}, \text{ref}) \left(\frac{D_{\text{VOC}-\text{gas}}}{D_{\text{VOC}, \text{ref}-\text{gas}}} \right)^n \quad (1.24)$$

เมื่อ $k_{La}(\text{VOC})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$k_{Ga}(\text{VOC})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$k_{La}(\text{VOC}, \text{ref})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$k_{Ga}(\text{VOC}, \text{ref})$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$D_{\text{VOC}-\text{Liquid}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคของเหลว, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

$D_{\text{VOC}, \text{ref}-\text{liquid}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC อ้างอิงในวัฏภาคของเหลว, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

$D_{\text{VOC}-\text{gas}}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคแก๊ส, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

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

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับตัวเลขของ Schmidt

(Schmidt number)

Mackay and Yeun (1983) แนะนำว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารประกอบใดๆจะแปรผันโดยตรงกับเลข Schmidt ยกกำลัง -0.67 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารประกอบใดๆ สามารถปรับแก้สำหรับสารประกอบอื่นๆโดยใช้ Schmidt เป็นตัวปรับแก้ ได้ดังสมการ

$$k_{La} = c_L Sc_L^{-0.67} \quad (1.25)$$

และ
$$k_{Ga} = c_G Sc_G^{-0.67} \quad (1.26)$$

เมื่อ k_{La} = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $m^3 s^{-1}$

k_{Ga} = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 s^{-1}$

c_L, c_G = ค่าคงที่

$Sc_L = \frac{\mu_L}{D_L \rho_L}$ = ตัวเลข Schmidt ในวัฏภาคของเหลว

$Sc_G = \frac{\mu_G}{D_G \rho_G}$ = ตัวเลข Schmidt ในวัฏภาคแก๊ส

สมการ (1.25) ถึงสมการ (1.26) สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{La} และ k_{Ga} ของ VOC ใดๆ ที่ต้องการหาค่ากับ k_{La} และ k_{Ga} ของอีก VOC หนึ่งที่ใช้เป็นสารอ้างอิงได้ดังสมการ (1.27) ถึงสมการ (1.28)

$$k_{La}(VOC) = k_{La}(VOC,ref) \left(\frac{Sc_{L-VOC}}{Sc_{L-VOC,ref}} \right)^{-0.67} \quad (1.27)$$

$$k_{Ga}(VOC) = k_{Ga}(VOC,ref) \left(\frac{Sc_{G-VOC}}{Sc_{G-VOC,ref}} \right)^{-0.67} \quad (1.28)$$

- เมื่อ $k_{L,a}(\text{VOC}) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 $k_{G,a}(\text{VOC}) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 $k_{L,a}(\text{VOC,ref}) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 $k_{G,a}(\text{VOC,ref}) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
 $Sc_{\text{VOC-Liquid}} =$ ตัวเลขของ Schmidt ในวัฏภาคของเหลว (ไม่มีหน่วย)
 $Sc_{\text{VOC-gas}} =$ ตัวเลขของ Schmidt ในวัฏภาคแก๊ส (ไม่มีหน่วย)

ความสัมพันธ์ตามสมการ (1.18) ถึงสมการ (1.19) สมการ (1.23) ถึงสมการ (1.24) และ สมการ (1.27) ถึงสมการ (1.28) ช่วยให้สามารถทำนาย $k_{L,a}$ และ $k_{G,a}$ ของ VOCs ใดๆที่ต้องการได้ ทำให้สามารถทำนายค่า $K_{O_L,a}$ ของ VOCs ใดๆได้จากค่า $k_{L,a}$ และ $k_{G,a}$ ตามสมการ (1.2) และสามารถหาค่า R_{VOCs} หรือ N_{VOCs} ของ VOCs ที่สนใจได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Thibodeaux (1978)

ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวในบ่อเติมออกซิเจนที่ได้จำลองขึ้นโดยศึกษาจากกระบวนการถ่ายโอนของออกซิเจนสู่น้ำและได้นำเสนอสมการเอมพิริคัลที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวกับกำลังที่ให้แก่ชุดกวน (aerator) ดังนี้

$$k_L = \frac{JP_0(1.024)^{T-20} \alpha(10^4)}{a_v V (165)} \left(\frac{D_{i\text{-water}}}{D_{O_2\text{-water}}} \right)^{0.5} \quad (1.29)$$

- เมื่อ $k_{L,\text{aerated}} =$ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวสำหรับ aerated surface , $\text{lbmol}/\text{ft}^2 \text{hr}$
 $J =$ อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนของ aerator = $3 \text{ lb O}_2/\text{hr-hp}$
 $P_0 =$ กำลังที่ให้แก่ชุดกวน , hp

α = แฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับการถ่ายโอนออกซิเจน (Oxygen transfer correction factor)

a_v = พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, ft^{-1}

V = ปริมาตร, ft^3

T = อุณหภูมิ, $^{\circ}\text{C}$

สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สนั้น Thibodeaux พบว่าจะขึ้นอยู่กับขนาดของหยดของของเหลวที่เกิดขึ้นและสมการเอ็มพิริคัลที่เขานำเสนอสำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สในบ่อเติมอากาศคือ

$$k_G = \frac{C_i D_{i-water}}{d_p} \left[2 + 0.347 (\text{Re}' Sc_G^{0.5})^{0.62} \right] \quad (1.30)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สสำหรับ Aerated surface

$$\text{Re}' = \text{Reynolds number} = \frac{d_p V \rho_{air}}{\mu_{air}}$$

C_i = ความเข้มข้นของสารประกอบ i ในของเหลว

d_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของของเหลว

Reinhart (1977)

ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สโดยใช้ถังกวนที่มีใบกวนแบบเรียบ (flat-bladed surface agitator) ได้ความสัมพันธระหว่าง k_G กับตัวแปรอื่นๆที่สำคัญๆ เช่น กำลัง ขนาดของใบกวน และความเร็วรอบของการกวนดังนี้

$$k_G = 0.00039 \frac{\rho_g D_{i-air}}{d} (\text{Re}')^{1.42} (N_p)^{0.4} (Sc_G)^{0.5} (Fr)^{-0.21} \quad (1.31)$$

$$\text{Re}' = \frac{d^2 \omega \rho_{air}}{\mu_{air}}$$

$$N_p = \frac{P_r g}{\rho_L d^2 \omega^3}$$

$$Fr = \frac{d\omega^2}{g}$$

- เมื่อ Re'' = Reynolds number
 d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ aerator
 ω = ความเร็วรอบของ aerator , rpm
 N_p = Power number
 g = ค่าคงที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational constant) = 9.8 m s^{-2}
 Fr = Froude number
 D_{i-air} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบ i ในอากาศ

การศึกษาของ Thibodeaux และ Reinhart เป็นการศึกษาจากกระบวนการเติมอากาศ และใช้สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวปรับแก้เพื่อให้สามารถใช้กับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายใดๆได้ นอกจากนี้สมการของทั้ง Thibodeaux และ Reinhart มีตัวแปรที่วัดค่าได้ยากรวมอยู่ในสมการด้วย ซึ่งจะทำให้การนำมาใช้งานไม่สะดวกเท่าที่ควร

Dewulf et al. (1998)

ได้ศึกษาหาค่า k_L จากการระเหยของ VOCs 13 ชนิดในถังกวนขนาดเล็ก ที่มีขนาดความสูง 30 cm. และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 cm. ในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ (25 ± 1 °C) และกวนให้ของเหลวไหลด้วยความเร็วรอบอยู่ในช่วง Transition regime และช่วงความปั่นป่วน (turbulent regime) ปริมาตรของของเหลวที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 5.4 ลิตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับ Reynold number เป็นไปตามสมการ (1.32)

$$k_L(VOC) = 8.15 \times 10^{-5} Re + 0.736 \quad (1.32)$$

และความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L(\text{VOC})$ กับ $k_L(\text{O}_2)$ เป็นไปตามสมการ

$$k_L(\text{VOC}) = 0.66k_L(\text{O}_2) \quad (1.33)$$

จากสมการ (1.33) จะเห็นว่าอัตราการถ่ายโอนของ VOCs จากบ่อเติมอากาศที่มี VOCs ปนเปื้อนอยู่จะมีค่าสูงพอสมควรเมื่อเทียบกับอัตราการถ่ายโอนของออกซิเจนสู่น้ำ นั่นคือระบบเติมอากาศใดที่ออกแบบให้มีการเติมอากาศได้ดีก็จะส่งผลให้มีการถ่ายโอนของ VOCs จากบ่อเติมอากาศเพิ่มขึ้นด้วย ถึงแม้ว่างานของ Dewulf et al. จะได้ศึกษาไว้กับ VOCs หลายชนิดแต่ก็ไม่ได้ทำการศึกษาค่า k_G อีกทั้งยังไม่ได้รวมผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลไว้ในการศึกษานี้แต่อย่างใด

Rathbun and Tai (1983)

ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อ k_G จากการระเหยของสารอินทรีย์จำพวกคีโตน 7 ชนิด ได้แก่ อะซีโตน, 2-บิวทานอน, 2-เพนทานอน, 3-เพนทานอน, 4-เมทิล-2-เพนทานอน, 2-เฮปทานอน และ 2-ออกทานอน โดยทำการระเหย VOCs ดังกล่าวในถาดซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และสูง 1.5 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 293.2-313.2 K พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับอุณหภูมิตามสมการ

$$k_G = a_A \exp(b_A T) \quad (1.34)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, m s^{-1}

T = อุณหภูมิของสารละลาย, K

a_A, b_A = ค่าคงที่

สำหรับค่าคงที่ a_A และ b_A ของแต่ละสารสามารถหาได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง k_G กับอุณหภูมิตามสมการ $\log\text{-}\log$ โดยค่า a_A และ b_A คือค่าจุดตัดแกน (intercept) และความชัน (slope) ของกราฟดังกล่าว ค่าคงที่ a_A และ b_A ที่ได้จากการระเหยสารอินทรีย์บริสุทธิ์แสดงดังตาราง 1

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

สารอินทรีย์	a_A (m day ⁻¹)	b_A (K ⁻¹)
อะซีโตน	3.33	0.0147
2-บิวทาโนน	24.3	0.00991
2-เพนทาโนน	22.9	0.00978
3-เพนทาโนน	15.0	0.0112
4-เมทิล-2-เพนทาโนน	21.4	0.0101
2-เฮปทาโนน	17.8	0.0107
2-ออกทาโนน	12.8	0.0121

เนื่องจากการศึกษาของ Ruthbun and Tai (1983) กระทำในภาชนะขนาดเล็ก k_G ที่
ได้จึงไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำเปิดขนาดใหญ่

David et al. (2000)

ได้ศึกษาโมเดลเพื่อใช้สำหรับประมาณการระเหยของ VOCs จากท่อระบายน้ำทิ้งของ
ท่อใต้ดิน (underlying channel) ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม โดยการจำลองแบบท่อ
ระบายน้ำทิ้งและได้เปรียบเทียบค่า $k_L A_C$ ที่ได้ระหว่างท่อระบายแบบซีด (seal drain) กับท่อ
แบบไม่ซีด (open drain) โดยการระเหยของ VOCs 5 ชนิด ได้แก่ อะซีโตน เอทิลอะซีโตน
โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซโคลเบนซีน พบว่าค่า $k_L A_C$ ของท่อไม่ซีดอยู่ในช่วง 1.9-14.4 L min⁻¹
ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 Lmin⁻¹ และท่อซีดมีค่า $k_L A_C$ อยู่ในช่วง 2.9-4.9 L min⁻¹ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ
4.1 L min⁻¹ อย่างไรก็ตาม $k_L A_C$ ที่วัดได้อยู่ในช่วงแคบๆ และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า $k_L A_C$
สำหรับการทดลองนี้คือ อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำ และผลจากการทดลองนำไป
พัฒนาเป็นสมการทั่วไปเพื่อใช้สำหรับการประมาณการระเหยของ VOCs โดยใช้ทฤษฎีสอง
ฟิล์มเป็นพื้นฐาน ดังสมการ

$$k_L A_c = [-1350(V_1 - 0.249)^2 + 149.5](Sc)^{0.5}, 0.0 < V_1 < 0.5 \text{ m s}^{-1}, r^2 = 0.69 \text{ (open drain)} \quad (1.35)$$

$$k_L A_c = 64.4 (Sc)^{0.5}, V_1 < 0.5 \text{ m s}^{-1} \text{ (open drain)} \quad (1.36)$$

$$k_L A_c = 205 V_1^{0.435} Sc^{0.5}, r^2 = 0.81 \text{ (seal drain)} \quad (1.37)$$

เมื่อ $k_L A_c$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในท่อ, $L \text{ min}^{-1}$

V_1 = ปริมาตรของของเหลวรวมในระบบ, L

Sc = Schmidt number (ไม่มีหน่วย)

Chern and Yu (1999)

ได้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในกระบวนการระเหยของ VOCs จากระบบบำบัดน้ำเสียจำลองใช้ถังเดิมอากาศขนาด 500 L มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.83 m. สูง 1.2 m. จากนั้นเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยทฤษฎีสองฟิล์มและ ASCE-based model (American Society of Civil) พบว่าการทำนายด้วยทฤษฎีสองฟิล์มให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองในขณะที่ ASCE-based model ให้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

Özbek and Gayik (2001)

ศึกษาผลของความแตกต่างในกระบวนการทดสอบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนในเฟสของของเหลว ($k_L a$) พบว่าภายใต้สภาวะที่ใช้ น้ำกลั่น, มีการกวนด้วยความเร็ว 300 rpm, อัตราการไหลของอากาศ 0.31 min^{-1} , อุณหภูมิ 37°C และ pH เท่ากับ 7 จะได้ค่า $k_L a$ เท่ากับ 2.766 min^{-1} และภายใต้สภาวะที่เหมือนกันแต่เปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นน้ำกลั่นผสมกลีเซอรอล, น้ำกลั่นที่มี BSP และกลีเซอรอลผสมกับน้ำกลั่นที่มี BSP จะได้ค่า $k_L a$ เท่ากับ 1.383, 0.933 และ 0.450 min^{-1} ตามลำดับ

Matter-Müller et al. (1981)

ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs 6 ชนิด ในระบบเติมอากาศ จากการทดลองพบว่าการถ่ายโอนของ VOCs จากน้ำสู่บรรยากาศขึ้นอยู่กับลักษณะการติดกันของแก๊สและของเหลว (bubble aeration, surface aeration, stripping tower etc.) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลอีกด้วย ซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ ได้แก่ อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (alkylbenzenesulfonates), เปปไทด์ (peptide) และ palmitic acid จากการทดลองพบว่า อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และ เปปไทด์ จะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมากกว่า palmitic acid

Lin and Leu (1998)

ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของ DO โดยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มี 3 ชนิด คือ sodium dodecylbenzyl sulfonate (SDS) และ dodecyl sulfate sodium salt (LAS) ซึ่งเป็นสารจำพวก anionic surfactant และ alcohol ethoxylate (AE) เป็นสารจำพวก nonionic surfactant พบว่า การที่มีสารลดแรงตึงผิวในน้ำจะมีผลน้อยต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ DO

Peng et al. (1995)

ศึกษา k_L จากการระเหยของ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่มากกว่า $10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mole}^{-1}$ ภายใต้สภาวะความปั่นป่วนโดยใช้ใบกวนแบบเรียบ (flat-bladed) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 23.5°C ถึง 26.0°C และใช้โมเดลจำลองจากแนวความคิด แบบทฤษฎีการเปลี่ยนผิว (surface renewal theory) จากการทดลองพบว่าการระเหยของ VOCs จากน้ำสู่บรรยากาศเป็นไปตามกลศาสตร์อันดับหนึ่ง และความสัมพันธ์ของ k_L เป็นไปตามสมการ (1.38)

$$k_L = 22.1 D^{1/2} G^{1/3} \frac{1 + \exp\left(-0.0131 D \frac{-1}{2} G \frac{1}{3}\right)}{1 - \exp\left(-0.0131 D \frac{-1}{2} G \frac{1}{3}\right)} \quad (1.38)$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนฟิล์มของเหลว

D = โมเลกุลการแพร่ของสารเคมีในน้ำ, $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$

G = velocity gradient, s^{-1}

วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาผลของความเร็วรอบของชุดกวนในบ่อเติมอากาศจำลองต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำในบ่อเติมอากาศจำลองต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว
3. พัฒนাসมาการเอมพิริคัล (empirical) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว กับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วรอบของการกวน และอุณหภูมิของน้ำ
4. ศึกษาแนวทางการลดอัตราการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากบ่อเติมอากาศโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สมการเอมพิริคัลของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาอัตราการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากบ่อเติมอากาศ
2. นำไปสู่การคิดหาวิธีการป้องกันการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากบ่อเติมอากาศ