

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

การใช้งานของสารประกอบอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOC) ในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งมีการใช้สารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ เช่น โทลูอิน (toluene) ไซลีน (xylene) เบนซีน (benzene) คลอโรฟอร์ม (chloroform) อะซีโตน (acetone) เมทิล เอทิล คีโตน (methyl ethyl ketone, MEK) และ เมทานอล (methanol) โดยอุตสาหกรรมที่มีการใช้ VOC ในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเคลือบผิว อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ตลอดจนใช้เป็นตัวทำละลายเพื่อล้างชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรในขั้นตอนการซ่อมบำรุง จากอุตสาหกรรมข้างต้น ส่งผลให้ VOC ส่วนหนึ่งเกิดการปนเปื้อนในน้ำทิ้งของโรงงาน ซึ่งน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด VOC ที่ปนเปื้อนอยู่นั้นสามารถเกิดการระเหย และแพร่กระจายได้ (Nikolaou et al., 2002; Dubray and Vanderschuren ., 2004; Quigley and Corsi., 1995) นอกจากนี้ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเปิด มีผลให้ VOC ที่เหลืออยู่สามารถระเหยออกสู่บรรยากาศได้ โดยอาศัยกระแสลมที่พัดผ่านผิวน้ำ อุณหภูมิของแหล่งน้ำ ตลอดจนกระบวนการเติมอากาศในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย (Chern and Yu., 1999) การระเหยของ VOC จากน้ำเสียสู่บรรยากาศ นอกจากจะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตทั้งคน สัตว์ และพืชโดยตรง ซึ่งเป็นปัญหาที่ควรหาแนวทางแก้ไขต่อไป

การทราบถึงปริมาณการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำเสียในช่วงเวลาที่สนใจเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการหาแนวทางป้องกันปัญหามลภาวะทางอากาศ จากข้อมูลการระเหยของ VOC ในระบบบำบัดน้ำเสียของ EPA (<http://www.epa.gov/>) พบว่า รัฐ WASHINGTON, UTAH, LOUISIANA และ VIRGINIA ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1993 มีการระเหยของ VOC ออกสู่บรรยากาศรวม 1015.33 ตันต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก อย่างไรก็ตาม การศึกษาการระเหยของ VOC จากระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศไทยมีรายงานไว้น้อยมาก รวมถึงเป็นการศึกษาที่จำกัดอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำเปิด ได้แก่ ความเร็วลมเหนือผิวน้ำ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำ (จรัญ และคณะ 2544, Bunyakan et al., 2001) สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการ

ระเหยของ VOC จากน้ำเสียจริง ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของการระเหยต่อความลึกของแหล่งน้ำ ปริมาณของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย ความเร็วลมเหนือผิวน้ำ และกระบวนการย่อยสลายทางจุลินทรีย์ของ VOC ในน้ำเสีย โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจะนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองสำหรับทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียสู่บรรยากาศต่อไป

ตรวจเอกสาร

1. แบบจำลองทั่วไป (General Fate Models, GFM)

แบบจำลองทั่วไป (GFM) คือ แบบจำลองที่ใช้การดุลมวลสารในการคำนวณเฉพาะขอบเขตที่สนใจศึกษา สำหรับกรณีการระเหยของ VOC ในบ่อบำบัดน้ำเสียนั้น หากวัดการระเหยของ VOC โดยตรงในอากาศจะเสียค่าใช้จ่ายในการเก็บตัวอย่างและค่าวิเคราะห์ที่สูง เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลองทั่วไป ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์มากกว่า โดยแบบจำลองทั่วไปจะพิจารณาเส้นทางของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด ระบบไหลเวียนย้อนกลับ การระเหยของ VOC การดูดซับในผิวของแข็ง การระเหยเนื่องจากกระบวนการเติมอากาศ และการย่อยสลายโดย จุลินทรีย์ รวมทั้งน้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

แบบจำลองทั่วไปที่ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มข้อมูลซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ลักษณะของน้ำเสียเข้าประกอบด้วย

- อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย
- อุณหภูมิของน้ำเสีย
- อุณหภูมิของอากาศ
- ความเข้มข้นของ VOC
- ความเร็วลมเหนือผิวน้ำ

กลุ่มที่ 2 ลักษณะกายภาพของแหล่งน้ำประกอบด้วย

- ความกว้าง ยาว และลึกของแหล่งน้ำ
- ลักษณะของบ่อบำบัด เช่น บ่อเป็นชนิดแบบปิด หรือเปิดสู่บรรยากาศ

กลุ่มที่ 3 ข้อมูลการดำเนินการของระบบบำบัดประกอบด้วย

- ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด
- อัตราการเติมอากาศ

- ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ เป็นต้น

แบบจำลองทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการทำนายการระเหยของสารต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดย USEPA เป็นอีกหนึ่งองค์กรที่ให้การยอมรับแบบจำลองทั่วไป โดยแบบจำลองทั่วไปจะเป็นประโยชน์ในการทำนายการระเหยของ VOC ภายใต้สภาวะที่กำหนด และช่วยให้เข้าใจการระเหย การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ VOC ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวางแผนควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพต่อไป

2. สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (mass transfer coefficient) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient, K_{OLa}) สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (gas-film coefficient, k_Ga) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (liquid-film coefficient, k_La) แบบจำลองของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมีรายงานไว้สองรูปแบบ คือ แบบจำลองตามแนวความคิด และแบบจำลองที่เป็นสมการเอ็มพิริคัล ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานการทดลอง

2.1 แบบจำลองตามแนวความคิด (Conceptual model)

แบบจำลองตามแนวความคิด จัดเป็นแบบจำลองเบื้องต้น ที่สามารถอธิบายภาพพจน์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ซึ่งแบบจำลองตามแนวความคิดจะประกอบด้วย ทฤษฎีสองฟิล์ม ทฤษฎีการเปลี่ยนผิว ทฤษฎีชั้นขอบเขต และทฤษฎีการทะลุทะลวง

2.1.1 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film model, McCabe et al., 2001)

Whitman (1924) เสนอทฤษฎีสองฟิล์ม โดยสมมติให้ฟิล์มหนึ่งสองฟิล์มอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของแหล่งน้ำและอากาศ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลวนี้ คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการแพร่ของโมเลกุลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม ดังสมการ

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

$$k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \quad (1.1)$$

เมื่อ	k_G	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, m s^{-1}
	k_L	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, m s^{-1}
	D_G	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในวัฏภาคแก๊ส, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
	D_L	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในวัฏภาคของเหลว, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
	δ	=	ความหนาของชั้นฟิล์ม, m

จากทฤษฎีสองฟิล์มสามารถทำนายได้ว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลสารประกอบ อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับลักษณะของสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วลม ความหนืด ความหนาแน่น และอุณหภูมิของของเหลวซึ่งจะมีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม

2.1.2 ทฤษฎีการทะลุทะลวง (Penetration theory, Maucci et al., 2001)

Higbie (1935) เสนอทฤษฎีการทะลุทะลวงเพื่อใช้อธิบายอัตราชั่วคราวของการแพร่เข้าสู่ของไหลที่ค่อนข้างหนา ซึ่งความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสคงที่ โดยสมมติว่ามีกระแสนวนจากของไหลบัลค์เข้าสู่บริเวณผิวสัมผัส โดยโมเลกุลที่แพร่จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังอีกด้านของชั้นบางๆ ได้ หากสถานะที่เกิดไม่คงตัว และระยะเวลาของการสัมผัสสั้น ซึ่งจะได้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลตามสมการ 1.2 ซึ่งทฤษฎีนี้ทำนายว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่

$$k = 2 \left(\frac{D}{\pi t} \right)^{0.5} \quad (1.2)$$

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

2.1.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนผิว (Surface Renewal theory, Maucci et al., 2001)

Danckwerts (1951) เสนอทฤษฎีการเปลี่ยนผิว ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ปรับปรุงจากทฤษฎีการทะลุทะลวง โดยจะพิจารณาในกรณีที่ผิวของชิ้นส่วนของของไหล (fluid element) ถูกแทนที่ด้วยของไหลใหม่จากกระแสบัลล์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแสดงดังสมการ 1.3 ซึ่งจากสมการสามารถทำนายได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล ซึ่งเมื่อพิจารณาในทางกายภาพพบว่า ทฤษฎีนี้จะใกล้เคียงกับสถานะจริงมากกว่าทฤษฎีสองฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีการเปลี่ยนผิวนี้อาจไม่เป็นที่นิยมในการนำไปประยุกต์ใช้จริง เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง

$$k = (D\tau)^{0.5} \quad (1.3)$$

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

2.1.4 ทฤษฎีชั้นขอบเขต (Boundary layer theory, จูไรวัลย์, 2546)

Prandtl (1904) เสนอแนวคิดของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากทฤษฎีชั้นขอบเขต ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาทฤษฎีของของไหล และการถ่ายโอนความร้อนผ่านแผ่นบาง (flat plate) นั่นคือเมื่อขอบเขตอยู่ในช่วงราบเรียบ (laminar) ซึ่งมีเลข Reynold น้อยกว่า 3×10^5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{kL}{D} = 0.664 \text{Re}^{0.5} \text{Sc}^{0.33} \quad (1.4)$$

สำหรับการไหลในช่วงปั่นป่วน (turbulence) ซึ่งมีเลข Reynold มากกว่า 3×10^5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{kL}{D} = 0.037 Sc^{0.33} Re^{0.8} \quad (1.5)$$

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

2.2 แบบจำลองสมการเอ็มพิริคัล

แบบจำลองสมการเอ็มพิริคัลถูกนำมาใช้แทนแบบจำลองตามแนวความคิดเนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองตามแนวความคิดไม่สามารถวัดได้โดยตรง และ สถานะการทดลองที่นำมาใช้ในช่วงกว้าง ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขและพารามิเตอร์ให้ใกล้เคียงกับสถานะการทดลองเพื่อให้ผลการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

3. ทฤษฎีสองฟิล์ม และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (อมราภรณ์, 2545)

กระบวนการระเหยเป็นการถ่ายโอนมวลของสารจากแหล่งน้ำผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มของ Whitman (1924) โดยสมมติว่า ภูมิภาคของเหลวที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งแยกจากภูมิภาคอากาศโดยชั้นฟิล์มบางๆ ระหว่างของเหลวและอากาศ โดยการถ่ายโอนมวลเกิดจากการแพร่ของโมเลกุลข้ามผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคทั้งสองและสมมติว่าผิวสัมผัสอยู่ในสถานะคงตัว

อัตราการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำที่เวลาใดๆ (R_{VOCs}) สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม ดังสมการ

$$R_{VOCs} = K_{OL} a \left[C_{L,t} - \frac{HC_{G,t}}{RT} \right] \quad (1.6)$$

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

$$\begin{aligned}
K_{OL} &= \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว, m s}^{-1} \\
C_{L,t} &= \text{ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t, mol m}^{-3} \\
C_{G,t} &= \text{ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคแก๊สที่เวลา t, mol m}^{-3} \\
H &= \text{ค่าคงที่เฮนรี่, atm m}^3 \text{ mol}^{-1} \\
R &= \text{ค่าคงที่สากลแก๊ส, atm m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
a &= \text{พื้นที่ของการระเหย, m}^2 \\
T &= \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ของน้ำ, K}
\end{aligned}$$

การระเหยภายใต้สภาวะที่พื้นผิวมีความปั่นป่วน ส่งผลให้พื้นที่ของการระเหย (a) วัดได้ยากและแปรเปลี่ยนได้ตามระดับของความปั่นป่วน จึงนิยมเขียน Lumped Parameter ร่วมกับ K_{OL} ในรูปของ $K_{OL}a$ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (volumetric mass transfer coefficient)

จากทฤษฎีสองฟิล์ม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลวมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_Ga) และค่าคงที่ของเฮนรี่ (H) ดังสมการ

$$\frac{1}{K_{OL}a} = \frac{1}{k_La} + \frac{RT}{Hk_Ga} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned}
k_La &= \text{สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, m}^3 \text{ s}^{-1} \\
k_Ga &= \text{สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, m}^3 \text{ s}^{-1} \\
K_{OL}a &= \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว, m}^3 \text{ s}^{-1}
\end{aligned}$$

สำหรับกระบวนการระเหยของ VOC ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรรวมเมื่อสมดุลมวลรอบถังระเหย จึงสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาตรของสารละลายมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหย VOC ที่เวลาใดๆ ($R_{VOC,t}$) ปริมาตรของสารละลาย (V) และความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวที่เวลาใดๆ ($C_{L,t}$) ได้ดังสมการ

$$R_{VOC,t} = -V \frac{dC_{L,t}}{dt} \quad (1.8)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลาย, m^3
 $C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOC ที่เวลาใดๆ
 t = เวลาที่ใช้, s

สำหรับกรณีที่มีกระแสลมพัดผ่านผิวน้ำ พบว่า ความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคแก๊สมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลว เนื่องจากกระแสลมพัดพา VOC ออกไปทันทีที่ VOC ระเหยขึ้นมาจากแหล่งน้ำ ดังนั้นสมการ 1.6 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ 1.9 และทำการรวมสมการ 1.8 และ 1.9 ได้ ความสัมพันธ์ดังสมการ 1.10

$$R_{VOC,t} = K_{OL} a C_{L,t} \quad (1.9)$$

$$\frac{dC_{L,t}}{dt} = -\frac{K_{OL} a C_{L,t}}{V} \quad (1.10)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ 1.10 จากเวลาเท่ากับศูนย์ซึ่งความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวเท่ากับ $C_{L,0}$ ถึงเวลา t ใดๆ ซึ่งความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวเท่ากับ $C_{L,t}$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL} a$ กับความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวที่เวลาใดๆ ดังสมการ

$$\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,0}} = -\frac{K_{OL} a t}{V} \quad (1.11)$$

จากสมการ 1.11 สามารถหาค่า $K_{OL} a$ ของแต่ละการทดลองที่สภาวะต่างๆ ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \frac{C_{L,t}}{C_{L,0}}$ กับ t ของการทดลองนั้นๆ และค่า $K_{OL} a$ คือ

$$K_{OL} a = -slope V \quad (1.12)$$

อัตราการระเหยของ VOC ที่เวลาใดๆ สามารถหาได้จากผลคูณของค่า $K_{OL}a$ กับความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลว (ตามสมการ 1.9) สำหรับอัตราการระเหยตลอดกระบวนการสามารถหาได้ในทำนองเดียวกับสมการ 1.9 โดยใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยแทนความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ดังสมการ

$$R_{VOC,avg} = K_{OL}aC_{L,avg} \quad (1.13)$$

เนื่องจากในกระบวนการระเหย การลดลงของความเข้มข้น VOC ที่ศึกษาจะมีรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นการเฉลี่ยแบบลอการิทึม (log mean average) จึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งสมการ 1.13 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$R_{VOC,avg} = K_{OL}a \frac{(C_{L,f} - C_{L,0})}{\ln \frac{C_{L,f}}{C_{L,0}}} \quad (1.14)$$

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_Ga) (ปรียาภรณ์, 2544)

4.1 สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของ VOC ที่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว โดย VOC เหล่านี้มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ทำให้ค่าคงที่เฮนรีมีค่าสูงสูง จากสมการ 1.7 เมื่อ H มีค่าสูง สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$\frac{1}{K_{OL}a} = \frac{1}{k_La} \quad (1.15)$$

จากสมการ 1.15 สามารถหาค่า k_La ได้จากการวัด $K_{OL}a$ จากกระบวนการระเหยของ VOC ที่มีค่า H สูง สำหรับ VOC ที่มีค่าคงที่เฮนรีมากกว่า $5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$ ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลของ VOC กลุ่มนี้จะอยู่ในวัฏภาคของเหลวมากกว่าร้อยละ 90 ตัวอย่างของ VOC ในกลุ่มนี้ได้แก่ โทลูอิน และเบนซีน ซึ่งมีค่าคงที่เฮนรีที่ 25°C เท่ากับ 6.64×10^{-3} และ $5.5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$ ตามลำดับ

4.2 สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_G a$)

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_G a$) สามารถหาได้จากกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์ เนื่องจากกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จะไม่มี ความแตกต่างของความเข้มข้นเกิดขึ้น จึงไม่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว แต่ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จะอยู่ในวัฏภาคแก๊สทั้งหมด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการทดลองการระเหยของสารบริสุทธิ์ในถังระเหยขนาดใหญ่และมีกระแสลมพัดผ่านนั้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้นจึงต้องศึกษาหาค่า $k_G a$ จากการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ระเหยได้จากวัฏภาคของเหลวแทน โดยใช้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ซึ่งเป็นสารที่มีค่าคงที่เฮนรี่ต่ำ เมื่อ H มีค่าต่ำมากๆ สมการ 1.7 สามารถเขียนใหม่ดังสมการ

$$\frac{1}{K_{OL} a} = \frac{RT}{H k_G a}$$

หรือ

$$k_G a = \frac{RT K_{OL} a}{H} \quad (1.16)$$

จากสมการ 1.16 สามารถหาค่า $k_G a$ ได้จากการวัด $K_{OL} a$ จากกระบวนการระเหยของ VOC ที่มีค่าคงที่เฮนรี่ต่ำ โดย VOC ที่มีค่าคงที่เฮนรี่น้อยกว่า $5 \times 10^{-6} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$ จะมีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวล ในวัฏภาคแก๊สมากกว่าร้อยละ 90 ตัวอย่างของ VOC ในกลุ่มนี้ได้แก่ เมทานอล ซึ่งมีค่าคงที่เฮนรี่ที่ 25°C เท่ากับ $3.77 \times 10^{-6} \text{ atm m}^{-3} \text{ mol}^{-1}$

5. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติของโมเลกุล (อมราภรณ์, 2545)

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติของโมเลกุล

กฎการแพร่ของแกรแฮม (Graham's law of diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุลดังสมการ

$$k = bM^{-0.5} \quad (1.17)$$

จากสมการ 1.17 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ กับน้ำหนักโมเลกุลของ VOCs ใดๆ ได้ดังนี้

$$k_L a = b_L M^{-0.5} \quad (1.18)$$

และ

$$k_G a = b_G M^{-0.5} \quad (1.19)$$

เมื่อ	$k_L a$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $m^3 \cdot s^{-1}$
	$k_G a$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 \cdot s^{-1}$
	b_L, b_G	=	ค่าคงที่
	M	=	น้ำหนักโมเลกุล, $g \cdot mol^{-1}$

สมการ 1.18 และ 1.19 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOCs ใดๆ กับ $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOC อ้างอิงได้ดังสมการ 1.20 ถึงสมการ 1.21

$$k_L a(VOC) = k_L a(VOC, ref) \left[\frac{M_{VOC, ref}}{M_{VOC}} \right]^{0.5} \quad (1.20)$$

$$k_G a(VOC) = k_G a(VOC, ref) \left[\frac{M_{VOC, ref}}{M_{VOC}} \right]^{0.5} \quad (1.21)$$

เมื่อ	$k_L a(VOC)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC, $m^3 \cdot s^{-1}$
	$k_G a(VOC)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC, $m^3 \cdot s^{-1}$
	$k_L a(VOC, ref)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง, $m^3 \cdot s^{-1}$
	$k_G a(VOC, ref)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง, $m^3 \cdot s^{-1}$
	M_{VOC}	=	น้ำหนักโมเลกุลของ VOC, $g \cdot gmol^{-1}$
	$M_{VOC, ref}$	=	น้ำหนักโมเลกุลของ VOC อ้างอิง, $g \cdot gmol^{-1}$

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่ (อมรากรณ์, 2545)

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลถูกสมมติให้แปรเปลี่ยนตามสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังสมการ

$$k = aD^n \quad (1.22)$$

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

จากสมการ 1.22 ค่า n ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้ โดยแบบจำลองสองฟิล์ม (two film model) ค่า n เท่ากับ 1.0 แบบจำลองการทะลุทะลวง (Penetration model) ค่า n เท่ากับ 0.5 และแบบจำลองฟิล์ม-การทะลุทะลวง (film-penetration) กำหนดให้ค่า n ขึ้นอยู่กับสถานะของการผสมโดยค่า n มีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับการผสมที่ดี (high mixing conditions) ถึง $n = 1.0$ สำหรับสถานะที่มีการผสมต่ำ (low mixing conditions) จากหลักการความเหมือนระหว่างการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer-mass transfer analogy) ของ Sherwood and Pigford (1952) จะได้ค่า n เท่ากับ 0.667 แต่จากการทดลองของ Merchuk (1952) พบว่า ค่า $n = 0.684$ จะให้ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองมากที่สุดเมื่อการระเหยของสารบริสุทธิ์มีการเคลื่อนไหวของบัคเคิลมาก สำหรับการระเหยของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ Tamir และคณะ (1979) กล่าวว่าค่า n ที่เหมาะสม เท่ากับ 0.632 Gilland and Sherwood ทำการทดลองการระเหยของเหลว 9 ชนิดใน wet-wall column โดยให้อากาศไหลแบบปั่นป่วนได้ค่า $n = 0.56$ สอดคล้องกับการทดลองของ Dewulf et al. (1998) ซึ่งกล่าวว่าค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.50-0.65 Rathbun and Tai (1983) พบว่าค่า $n = 0.568$ ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ 1.22 จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ใดๆ ได้ดังนี้

$$k_L a = a_L D_L^n \quad (1.23)$$

และ

$$k_G a = a_G D_G^n \quad (1.24)$$

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

สมการ 1.23 และสมการ 1.24 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOCs ใดๆ เท่ากับ $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOC อ้างอิงได้ดังสมการ 1.25 และสมการ 1.26

$$k_L a(VOC) = k_L a(VOC, ref) \left[\frac{D_{VOC-liquid}}{D_{VOC,ref-liquid}} \right]^n \quad (1.25)$$

$$k_G a(VOC) = k_G a(VOC, ref) \left[\frac{D_{VOC-gas}}{D_{VOC,ref-gas}} \right]^n \quad (1.26)$$

เมื่อ	$k_L a(VOC)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC, $m^3 s^{-1}$
	$k_G a(VOC)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC, $m^3 s^{-1}$
	$k_L a(VOC,ref)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง, $m^3 s^{-1}$
	$k_G a(VOC,ref)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง, $m^3 s^{-1}$
	$D_{VOC-liquid}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคของเหลว, $cm^2 s^{-1}$
	$D_{VOC,ref-liquid}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC อ้างอิงในวัฏภาคของเหลว, $cm^2 s^{-1}$
	$D_{VOC-gas}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในวัฏภาคแก๊ส, $cm^2 s^{-1}$
	$D_{VOC,ref-gas}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC อ้างอิงในวัฏภาคแก๊ส, $cm^2 s^{-1}$

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับตัวเลขของ Schmidt (Mackay and Yeun, 1983)

Mackay and Yeun (1983) กล่าวว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารประกอบใดๆ มีความสัมพันธ์กับเลข Schmidt ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารประกอบใดๆ สามารถประยุกต์ใช้กับสารประกอบอื่นๆ โดยใช้เลข Schmidt ดังสมการ

$$k_L a = c_L S c_L^{-0.67} \quad (1.27)$$

และ
$$k_G a = c_G Sc_G^{-0.67} \quad (1.28)$$

เมื่อ $k_L a =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $m^3 s^{-1}$
 $k_G a =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $m^3 s^{-1}$
 $c_L, c_G =$ ค่าคงที่
 $Sc_L = \frac{\mu_L}{D_L \rho_L} =$ ตัวเลข Schmidt ในวัฏภาคของเหลว
 $Sc_G = \frac{\mu_L}{D_G \rho_G} =$ ตัวเลข Schmidt ในวัฏภาคแก๊ส

สมการ 1.27 และสมการ 1.28 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOCs ใดๆ เท่ากับ $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOC อ้างอิงได้ดังสมการ 1.29 และสมการ 1.30

$$k_L a(VOC) = k_L a(VOC, ref) \left[\frac{Sc_{L-VOC}}{Sc_{L-VOC, ref}} \right]^{-0.67} \quad (1.29)$$

$$k_G a(VOC) = k_G a(VOC, ref) \left[\frac{Sc_{G-VOC}}{Sc_{G-VOC, ref}} \right]^{-0.67} \quad (1.30)$$

เมื่อ $k_L a(VOC) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC, $m^3 s^{-1}$
 $k_G a(VOC) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC, $m^3 s^{-1}$
 $k_L a(VOC, ref) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC อ้างอิง, $m^3 s^{-1}$
 $k_G a(VOC, ref) =$ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC อ้างอิง, $m^3 s^{-1}$
 $Sc_{VOC-liquid} =$ ตัวเลขของ Schmidt ในวัฏภาคของเหลว (ไม่มีหน่วย)
 $Sc_{VOC-gas} =$ ตัวเลขของ Schmidt ในวัฏภาคแก๊ส (ไม่มีหน่วย)

ความสัมพันธ์ตามสมการ 1.20 1.21 1.25 1.26 1.29 และ 1.30 สามารถทำนายค่า $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOCs ใดๆ นำค่า $k_L a$ และ $k_G a$ แทนในสมการ 1.7 เพื่อหาค่า $K_{OL} a$ ซึ่งสามารถหาค่า R_{VOCs} หรือ N_{VOCs} ของ VOCs ที่สนใจได้

VOC ในรูปของตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ ที่พบโดยทั่วไป แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้สามารถระเหยขึ้นสู่อากาศ ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ จากการรายงานของศูนย์วิทยาศาสตร์นานาชาติ พบว่า สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคมะเร็ง และสารประกอบวงแหวนไฮโดรคาร์บอนเมื่อรวมตัวกับออกไซด์ของไนโตรเจนจะก่อให้เกิดกลุ่มหมอกที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 1 สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบ โดยทั่วไป

เลขที่	สารอินทรีย์ระเหยง่าย
1	Acetaldehyde
2	Acetone
3	Benzene
4	Carbon tetrachloride
5	Ethyl acetate
6	Ethylene glycol
7	Formaldehyde
8	Heptane
9	Hexane
10	Isopropyl alcohol
11	Methyl ethyl ketone
12	Methyl chloride
13	Monomethyl ether
14	Naphthalene
15	Styrene
16	Toluene

ที่มา : Khan and Ghoshol, 2000

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bianchi and Varney (1998)

ศึกษาสารอินทรีย์ระเหยบริเวณแม่น้ำเมือง Southampton พบว่า การถ่ายโอนมวลของสารอินทรีย์ระเหยมี 2 กระบวนการที่สำคัญคือ กระบวนการระเหย และกระบวนการดูดซับ ซึ่งกระบวนการระเหยเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารละลาย โดยพบว่าการระเหยของสารอินทรีย์ประมาณ 300 กิโลกรัมต่อวันในฤดูหนาว และสูงถึง 2000 กิโลกรัมต่อวันในฤดูร้อน และกระบวนการดูดซับจะขึ้นกับผิวหน้าของของแข็งในแหล่งน้ำ ในการทดลองพบว่า สารอินทรีย์จำพวกสารวงแหวนและสารที่มีหมู่เฮโลเจนเป็นองค์ประกอบจะเกิดการดูดซับไม่เกินร้อยละ 5

Brida and Kee Ong (2001)

ศึกษาการถ่ายโอนมวลของ VOC ในสารตัวกลางที่มีรูพรุนและอิมด้วย VOCs บรรจุในแผ่นอะคริลิกซึ่งยาว 17.5 cm กว้าง 5 cm และลึก 11 cm ในอุโมงค์ลม โดยควบคุมความเร็วลม เท่ากับ 2.5 cm s^{-1} ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ($21 \pm 2^\circ\text{C}$) โดยให้มีความเข้มข้นของ VOCs อยู่ในระหว่าง $8\text{-}150 \text{ mg L}^{-1}$ เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของอากาศที่ไหลผ่าน พบว่า ความเข้มข้นของ VOC มีค่าน้อยกว่า 0.5 mg L^{-1} และเมื่อหาค่าความเข้มข้นของ VOC ในวัฏภาคของเหลวที่ระดับความลึกต่างๆ พบว่า ระดับความลึกน้อยกว่า 2 cm ความเข้มข้นของ VOCs มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลาอย่างชัดเจน แต่ที่ระดับความลึกมากกว่า 2 cm ความเข้มข้นจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาศึกษา

Bunayakan et al. (2001)

ศึกษาการระเหยของ VOC โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มในการระเหยของโทลูอิน และเมทานอลจากแหล่งน้ำ โดยควบคุมความเร็วลมในช่วง $0 - 4.8$ เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25 - 45$ องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิแหล่งน้ำคงที่ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_G) มีความสัมพันธ์กับความเร็วลมแบบเส้นตรงตลอดช่วงของความเร็วลมที่ศึกษาตามสมการ 1.31 และความสัมพัทธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) กับความเร็วลมสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง โดยมีจุดการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ความเร็วลม เท่ากับ 2.58 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในสมการ 1.32 และ 1.33 ซึ่งพบว่าที่ความเร็วลมคงตัว k_G และ k_L จะมีค่าเพิ่มขึ้น จากข้อมูลดังกล่าวสามารถ

พัฒนาเป็นแบบจำลองเพื่อทำนายอัตราการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำจำลองในห้องปฏิบัติการ
ได้ดี

$$k_G(VOC) = [4.37 \times 10^{-3} U_{10cm} + 2.25 \times 10^{-3}] \left(\frac{32.04}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.31)$$

สำหรับ $0 \leq U_{10cm} \leq 4.80$ เมตรต่อวินาที

และ

$$k_L(VOC) = [2.33 \times 10^{-6} U_{10cm} + 9.71 \times 10^{-6}] \left(\frac{92.14}{MW_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.32)$$

สำหรับ $0 \leq U_{10cm} \leq 2.58$ เมตรต่อวินาที

$$k_L(VOC) = [1.89 \times 10^{-5} U_{10cm} + 3.38 \times 10^{-5}] \left(\frac{92.14}{MW_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.33)$$

สำหรับ $2.58 \leq U_{10cm} \leq 4.80$ เมตรต่อวินาที

เมื่อ	$k_L(VOCs)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ใดๆ, $m s^{-1}$
	$k_G(VOCs)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ใดๆ, $m s^{-1}$
	U_{10cm}	=	ความเร็วลมที่ระยะ 10 เซนติเมตรเหนือผิวน้ำ, $m s^{-1}$
	MW_{VOC}	=	น้ำหนักของโมเลกุลของ VOC ใดๆ, $g mol^{-1}$

Chin Hsieh (2000)

ศึกษากลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการตะกอนเร่ง และหาแพกเตอร์ที่มีผลต่อการ
กำจัด VOC ออกจากระบบ โดยใช้สมการมวล และแบบจำลองทั่วไปตามสมการ

$$V \frac{dC_L}{dt} = Q_L C_{Li} - Q_E C_L - Q_W C_L - r_{ads} - r_m - r_{bio} \quad (1.34)$$

เมื่อ	V	=	ปริมาตรของแหล่งน้ำ (m^3)
	C_L	=	ความเข้มข้นขาออกของสาร ($mg L^{-1}$)
	C_{Li}	=	ความเข้มข้นขาเข้าของสาร ($mg L^{-1}$)
	T	=	เวลา (d)

Q_L	=	อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย ($m^3 d^{-1}$)
Q_E	=	อัตราการไหลออกของน้ำเสีย ($m^3 d^{-1}$)
Q_W	=	อัตราการของตะกอนที่ ($m^3 d^{-1}$)
r_m	=	อัตราการระเหยออก ($g d^{-1}$)
r_{bio}	=	อัตราการย่อยสลายทางจุลินทรีย์ ($g d^{-1}$)
r_{ads}	=	อัตราการดูดซับ ($g d^{-1}$)

1. อัตราการระเหยออก

อัตราการระเหยออกเมื่อมีการเติมอากาศเป็นไปตามสมการ

$$r_m = Q_G H_C C_L S_d \quad (1.35)$$

เมื่อ	Q_G	=	อัตราการไหลของอากาศ ($m^3 d^{-1}$)
	H_C	=	ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant)
	S_d	=	ค่าการอิ่มตัวของสาร VOC ในฟองอากาศ

2. การหาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายทางจุลินทรีย์ k_b

อัตราการย่อยสลายทางจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ VOC โดย VOC ที่มีความเข้มข้นสูงอัตราการย่อยสลายทางจุลินทรีย์จะเป็นแบบลำดับที่ศูนย์ แต่สำหรับ VOC ความเข้มข้นต่ำอัตราการย่อยสลายทางจุลินทรีย์จะเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1.36 (Namkung และ Rittmann, 1987)

$$r_{bio} = k_b x_b V C_L \quad (1.36)$$

เมื่อ	k_b	=	สัมประสิทธิ์การย่อยสลายทางจุลินทรีย์ ($m^3 \text{ g VSS-d}^{-1}$)
	x_b	=	ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ยังว่องไว ($\text{g VSS-d } m^{-3}$)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย, m^3
	C_L	=	ความเข้มข้นขาออกของสารที่ต้องการ (mg L^{-1})

3. อัตราการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเกิดจากการดูดซับสารประกอบอินทรีย์บนผิวหน้าของแข็งเนื่องจากอนุภาคของจุลินทรีย์หรือของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย ซึ่งสามารถหาอัตราการดูดซับได้จากสมการ

$$r_{ads} = Q_w X_w k_p C_L \quad (1.37)$$

เมื่อ	X_w	=	ความเข้มข้นของเซลล์ที่ตาย ($\text{g VSS-d } /m^3$)
	k_p	=	partition coefficient ($m^3/\text{g VSS-d}$)
			โดยค่า k_p จะมีความสัมพันธ์กับค่า partition coefficient ของ ออกทานอล/น้ำ (K_{ow}) ดังนี้

$$k_p = (6.3 \times 10^{-7}) f_{oc} K_{ow} \quad (1.38)$$

เมื่อ	f_{oc}	=	สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ในของแข็ง ($\text{g organic carbon } \text{gVSS}^{-1}$)
	K_{ow}	=	octanol/water partition coefficient ($m^3 m^{-3} \text{ octanol}$)

กรณีองค์ประกอบของเซลล์มีโครงสร้าง $C_5H_7NO_2$ ค่า f_{oc} จะ เท่ากับ 0.53 ดังนั้น จาก สมการที่ 1.37 สามารถเขียนใหม่ได้สมการ

$$r_{ads} = 3.35 \times 10^{-7} Q_w X_w k_p C_L \quad (1.39)$$

โดยพบว่าค่า stripping removal มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ VOC Henry's constant เพิ่มขึ้น และ stripping rate ลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (active biomass concentration, X_b) ประสิทธิภาพการถ่ายโอนออกซิเจน (OTE) และระยะเวลาพักเก็บน้ำ (HRT) ส่งผลให้ค่าการกำจัด VOC รวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Kemp et al. (2000)

ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการหายไปของ VOC ทางชีวภาพในระบบตะกอนเร่งจากน้ำเสียครัวเรือน และน้ำเสียสังเคราะห์ ในปฏิกรณ์ขนาด 24 ลิตร โดยมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระหว่าง 1000 และ 2500 mg L⁻¹ และความเข้มข้นของ VOC ที่สนใจเท่ากับ 100 mg L⁻¹ ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน จะให้อัตราการหายไปของ VOC สูงสุด และค่า DO และ COD ไม่มีผลต่ออัตราการหายไปของ VOC ทางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ

Maeda et al. (2004)

ศึกษาจลนศาสตร์การย่อยสลายทางจุลินทรีย์ของ o-cresol โดยทดลองในปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งมีความสูง เท่ากับ 65 cm และ เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 7.5 cm ความเข้มข้นเริ่มต้นของ o-cresol เท่ากับ 300 mg L⁻¹ ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ เท่ากับ 2500 mg L⁻¹ เติมาอากาศในปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 0.5 L min⁻¹ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่า pH ในการทดลอง เท่ากับ 7 และอุณหภูมิ เท่ากับ 25 °C ซึ่งพบว่าสามารถอธิบายโดยใช้สมการ Haldane ดังสมการ 1.40 และมีค่าแฟกเตอร์ความถูกต้องเท่ากับ 0.95

$$r_s = \frac{k_m SX}{K_s + S + S^2 / K_I} \quad (1.40)$$

เมื่อ r_s = อัตราการย่อยสลายทางจุลินทรีย์ของ o-cresol

k_m = μ_m/Y

μ_m = อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

Y = ชีวมวลบนสับสเตรต

X = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์, mg L⁻¹

S = ความเข้มข้นของ o-cresol, mg L⁻¹

Nikolaou et al. (2002)

ตรวจสอบปริมาณของ VOC ด้วยวิธี trap-gas chromatography-mass spectrometry method จากแหล่งน้ำต่างๆ ได้แก่ แม่น้ำ ทะเลสาบ และระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศกรีซ ระหว่างเดือนตุลาคม ปี 1998 ถึง กันยายน ปี 1999 พบว่าแม่น้ำมี VOC ถึง 41 ชนิด น้ำเสียจากระบบบำบัดมี VOC 31 ชนิด และค่าเฉลี่ยของ VOC จากแหล่งชุมชน และโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานมีค่าเท่ากับ 229.35 $\mu\text{g/L}$ และบางส่วนไม่สามารถตรวจสอบได้

จรัญ และคณะ (2543)

ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารของกระบวนการระเหยของ VOC จากน้ำ โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส (k_G) และในวัฏภาคของเหลว (k_L) ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ของเมทานอลและโทลูอินที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 และ 200 มก/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (K_{OLa} , k_G , k_L) จะแปรผันตามอุณหภูมิ โดยสามารถสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{OLa} , k_G , k_L) กับอุณหภูมิ ให้อยู่ในรูปของสมการอาร์เรเนียส โดยใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับ VOC ชนิดอื่น ได้ตามสมการ 1.36 และ 1.37 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง

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

สำหรับ $293 \leq T \leq 313 \text{ K}$ (1.41)

$$k_G(VOCs) = \left[1.32 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{2266.3}{T}\right) \right] \left[\frac{D_{VOC-water}}{D_{methanol-water}} \right]$$

สำหรับ $293 \leq T \leq 313 \text{ K}$ (1.42)

เมื่อ	$k_L(VOCs)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC, m s^{-1}
	$k_G(VOCs)$	=	สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC, m s^{-1}
	T	=	อุณหภูมิของวัฏภาคของเหลว, K
	$D_{VOC-water}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC ในน้ำที่อุณหภูมิ T, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
	$D_{toluene-water}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโทลูอินในน้ำที่อุณหภูมิ T, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

$$D_{\text{methanol-water}} = \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทานอลในน้ำที่อุณหภูมิ } T, \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

จริญ และคณะ (2544)

ศึกษาการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำจำลองที่อุณหภูมิและความเข้มข้นสม่ำเสมอ เพื่อหาค่าฟลักซ์การระเหยของ VOC ที่ระเหยจากแหล่งน้ำของของผสมระหว่าง เมทิล เอทิล คีโตน (MEK) และอะซีโตน เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนายโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม และการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำภายใต้ความเร็วไม่คงตัว จากการทดลองพบว่า ฟลักซ์การระเหยของ VOC แต่ละชนิดของ VOC ที่ผสมกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และผลการระเหยของอะซีโตนจากแหล่งน้ำภายใต้ความเร็วไม่คงตัวสามารถนำไปใช้พัฒนาสมการเอ็มพิริคัลของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในการหาค่าฟลักซ์เฉลี่ยของ VOC ในช่วงเวลาที่สนใจได้

ปริยาภรณ์ (2543)

ศึกษาการระเหยของ VOC จากถังระเหยโดยควบคุมความเร็วลมเหนือผิวน้ำ ในช่วง $0-4.80 \text{ m s}^{-1}$ และอุณหภูมิของแหล่งน้ำในช่วง $25-45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของแก๊ส (k_G) มีความสัมพันธ์กับความเร็วลมแบบเส้นตรง ตลอดช่วงความเร็วลมที่ศึกษา ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_L) สามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงโดยมีจุดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเท่ากับ 2.58 m s^{-1} และเมื่ออุณหภูมิของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้นค่า k_L และ k_G มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากสมการเอ็มพิริคัลของ k_L และ k_G ที่ได้จากการศึกษาเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของสารอ้างอิงต่อน้ำหนักของโมเลกุลของ VOC ที่สนใจยกกำลัง 0.5 เป็นตัวปรับแก้ พบว่าสามารถทำนายอัตราการระเหยได้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง

อมราภรณ์ (2544)

ศึกษาการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำโดยวัดค่าการระเหยของ VOC ในรูปของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_{G,a}$) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($k_{L,a}$) จากการระเหยของเมทานอลและโทลูอีน โดยนำเสนอสมการเอ็มพิริคัลที่แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_{G,a}$) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($k_{L,a}$) กับตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วรอบของการกวน และอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ดังสมการ 1.43 และ 1.44 โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับสมการเอ็มพิริคัลที่ได้ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี นอกจากนั้นการเติม sodium dodecyl sulphate (SDS) จะเป็นการลดอัตราการระเหยของ VOC ที่ควบคุมโดยฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวได้ดี โดยค่า

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_{Ga}) ลดลงร้อยละ 76 และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_{La}) ลดลงร้อยละ 72 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม SDS

$$k_{La}(VOC) = (1.94 \times 10^{-7} + 5.62 \times 10^{-13} \text{ Re}^{1.62}) \left(\frac{D_{VOC-liq}}{D_{ref-liq}} \right) \quad (1.43)$$

$$k_{Ga}(VOC) = (3.55 \times 10^{-4} + 3.24 \times 10^{-8} \text{ Re}^{0.94}) \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{ref-air}} \right) \quad (1.44)$$

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

$$k_{La}(VOC) = (1.94 \times 10^{-7}) (\exp(0.0556(T - 300.15))) \left(\frac{M_{Toluene}}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.45)$$

$$k_{Ga}(VOC) = (3.55 \times 10^{-4}) (\exp(0.0206(T - 300.15))) \left(\frac{M_{Methanol}}{M_{VOC}} \right)^{0.5} \quad (1.46)$$

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของความเร็วมหาหนืดของน้ำ ความลึกของแหล่งน้ำเสีย และค่าของแข็งที่แขวนลอยต่อการระเหยของสาร VOC จากน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษากลไกการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของ VOC ในน้ำเสียที่ศึกษา
3. เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียในระดับห้องปฏิบัติการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของ VOC จากน้ำเสียจริง
2. ได้แบบจำลองที่นำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายอัตราการระเหยของ VOC จากแหล่งน้ำเสียจริง