บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของโรงงานอุตสาหกรรมที่กระจายไปทั่วในทุกพื้นที่ของประเทศไทย สำหรับปัญหามลพิษทางด้านอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ส่วนหนึ่งมาจากการปล่อยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound, VOCs) สู่บรรยากาศ ซึ่งเกิดขึ้นได้โดยตรงในกระบวนการ และในขั้นตอนการจัดการของเสียของอุตสาหกรรม เนื่องจาก สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในกระบวนการต่างๆจะปนเปื้อนไปกับน้ำใช้ ในกระบวนการ และถ่ายโอนไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานหรือชุมชน ซึ่งในขั้นตอนการลำเลียงน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดนั้น น้ำเสียมักไหลผ่านไปตามท่อลำเลียงน้ำทิ้ง ซึ่งโดยมากมักจะเป็นคูระบายน้ำแบบเปิด ทำให้ VOCs ส่วนหนึ่ง สามารถระเหยจากน้ำเสียสู่บรรยากาศได้ เนื่องจากปริมาณน้ำเสียที่ถูกปล่อยจากกระบวนการต่างๆไปตามท่อลำเลียงน้ำทิ้ง ในแต่ละวันหรือที่เวลาต่างกันมีปริมาณไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความแตกต่างของอัตราการไหลของน้ำในท่อระบายน้ำทิ้งนั้นและเนื่องจากน้ำในท่อระบายน้ำทิ้งมีการไหลและเคลื่อนที่ตลอดเวลาจึงเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศได้ ทำให้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถระเหยจากน้ำไปสู่อากาศได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการไหลในช่องทางเปิดที่มีผลต่อการระเหยของ VOCs มีรายงานไว้น้อยมากและจำกัดอยู่เฉพาะกับบางชนิดของ VOCs จึงสมควรที่จะมีการศึกษาเรื่องนี้เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายการระเหยของ VOCs จากการไหลผ่านช่องทางเปิดได้

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้เป็นตัวทำละลายโดยทั่วๆ ไป ได้แก่ โทลูอีน (toluene) ไซลีน (xylene) เบนซีน (benzene) คลอโรฟอร์ม (chloroform) อะซีโตน (acetone) เมธิล เอทธิล คีโตน (methyl ethyl ketone) เมทานอล (methanol) และ แอมโมเนีย (ammonia) เป็นต้น

กระบวนการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของ VOCs ในแหล่งน้ำและในวัฏภาคแก๊ส ปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมให้ VOCs ถ่ายโอนจากแหล่งน้ำสู่บรรยากาศขึ้นอยู่กับระบบและสภาวะที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วลม (Bunyakan *et al.*,

2001) ความลึกของชั้นน้ำและความเร็วลมที่พัดผ่านผิวน้ำ (Lunney *et al*., 1985) อัตราการไหลของน้ำ (David *et al*., 2000) (Koziel *et al*., 2001) และความปั่นป่วนในชั้นน้ำ (Dewulf *et al*., 1998) (Gualtieri, 2003) เป็นต้น

ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของ VOCs จากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดมีอยู่ 2 ประการหลักๆ คือ ความเร็วและความลึกของน้ำ ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบุปริมาณของ VOCs ที่ระเหยสู่บรรยากาศได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาวิธีการสำหรับการประมาณการระเหยของ VOCs โดยคำนึงถึงความเร็วในการไหลและความลึกของน้ำในรางเปิดเป็นปัจจัยหลัก วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้คือ การคำนวณค่าฟลักซ์การระเหยของ VOCs (N_{VOCs}) จากช่องทางเปิดโดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (two film theory) จากทฤษฎีนี้ฟลักซ์ของ VOCs ที่ถ่ายโอนผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำ และอากาศสู่สิ่งแวดล้อมจะมีความสัมพันธ์อยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว (overall mass transfer coefficient, K_{OL}) โดยค่า K_{OL} จะเป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (liquid film coefficient, k_L) สัมประสิทธิ์ฟิลม์แก๊ส (gas film coefficient, k_G) และค่าคงที่ของเฮนรี่ (Henry's constant, H) ดังนั้นค่า k_L และค่า k_G ของ VOCs จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องใช้ในการหาค่าฟลักซ์ของ VOCs

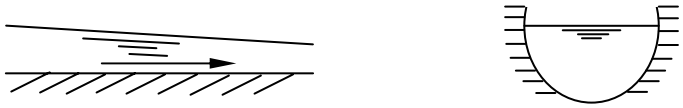
จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า k_L และ k_G ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระบบที่พิจารณา เช่น กรณีของการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดค่า k_L และ k_G จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมเหนือผิวน้ำและอุณหภูมิของแหล่งน้ำเป็นหลัก (จรัญและคณะ, 2544) สำหรับกรณีรางเปิด (open channel) ที่ไม่มีความชัน ค่า k_L และ k_G จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหลของน้ำและความลึกซึ่งจะแสดงถึงระดับความปั่นป่วนในชั้นน้ำในช่องทางเปิดนั่นเอง ดังนั้นการที่จะทำนายฟลักซ์การระเหยของ VOCs จากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดได้จึงจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่าง k_L และ k_G กับตัวแปรเหล่านี้

การตรวจเอกสาร

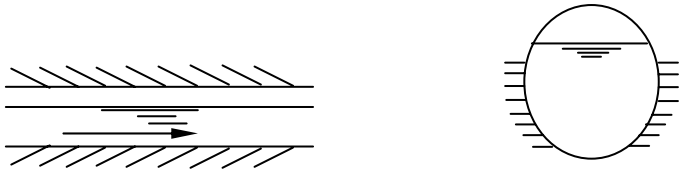
ในการศึกษาการทำนายฟลักซ์การระเหยของ VOCs จากรางเปิดโดยคำนึงถึงความเร็วในการไหลเป็นปัจจัยหลักมีทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. การไหลในรางเปิด (Open channel flow)

ของเหลวถูกขนส่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง อาจเป็นโดยธรรมชาติหรือโดยการใช้สิ่งอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทางที่ไหลผ่านไปเหล่านั้น บริเวณด้านบนอาจเปิดโล่งหรือปิดก็ได้ โครงสร้างที่มีการปิดด้านบนจะเรียกว่า "closed conduits" และที่มีการเปิดด้านบนโล่งสู่สิ่งแวดล้อมจะเรียกว่า "open channel" การไหลใน open channel โดยทั่วไปในธรรมชาติจะมีผิวหน้าที่เรียกว่า "free surface flow" หรือ "open channel flow" ซึ่งจะถูกกระทำโดยสภาวะความดันบรรยากาศ ซึ่งการไหลแบบ free surface แสดงได้ดังภาพประกอบ 1



a) open channel



b) closed conduits flow with free surface

ภาพประกอบ 1 แสดงสภาวะการไหลแบบ free surface

ที่มา : Chaudhry. M. H, 1993

รางเปิดอาจสามารถจำแนกชนิดออกตามการใช้งานต่างๆ เช่น รางเปิดลำเลียงข้างถนน คูชลประทาน ท่อระบายน้ำเสียที่มีลมพัดผ่าน เป็นต้น การไหลในรางเปิดเมื่อมีการไหลเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) สามารถใช้กฎการอนุรักษ์มวลได้ (conservative of mass) คือ

$$Q = AV \quad \text{หรือ} \quad A_1V_1 = A_2V_2 \tag{1.1}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (m^3/s)

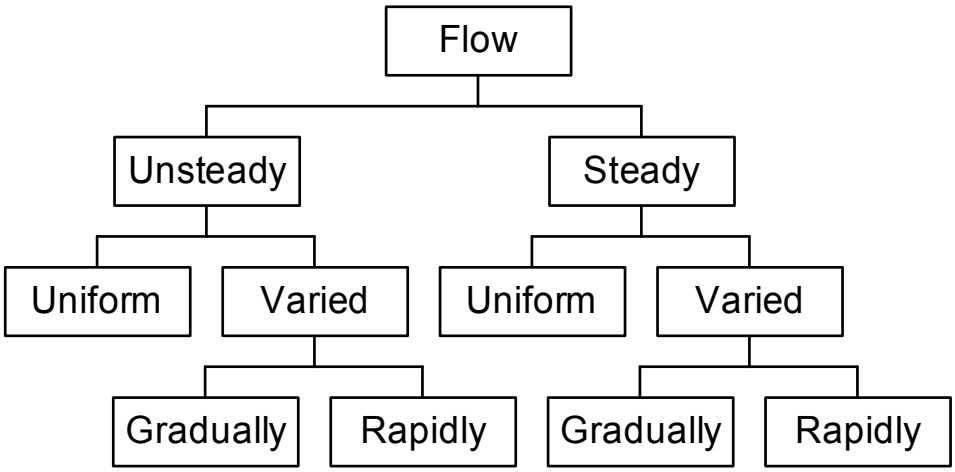
A = พื้นที่หน้าตัดของการไหลในราง (m^2)

V = ความเร็วในการไหลในราง (m/s)

1,2 = ตำแหน่งสองตำแหน่งที่ต่างกันตามความยาวของราง

1.1 การจำแนกชนิดของการไหล

การไหลแบบ free surface นั้นสามารถจำแนกได้เป็นหลายชนิดโดยใช้ความแตกต่างของจุดวิกฤติ (criteria) ในการจัดจำแนก (Chaudhry, 1993) ดังแสดงในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงการจัดจำแนกชนิดของการไหล
ที่มา : Chaudhry. M. H, 1993

1.1.1 Steady และ Unsteady flow

ถ้าความเร็วในการไหลที่จุดที่กำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาจะได้ว่า การไหลเป็นแบบ "steady flow" ถ้าความเร็ว ณ จุดที่สังเกตมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา จะเรียกว่า "unsteady flow"

1.1.2 Uniform และ Nonuniform flow

ถ้าความเร็วในการไหลเป็นค่าคงที่กับเวลาไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตลอดระยะทางตามรางเปิด จะเรียกว่า "uniform flow" แต่ถ้าหากว่าความเร็วในการไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อเทียบกับระยะทาง ดังนั้นเราจะเรียกว่า "nonuniform flow" หรือ "varied flow" นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงตามระยะทางนั้นยังสามารถจำแนกได้เป็น gradually varied ซึ่งก็คือความลึกในการไหล ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับระยะทาง ส่วน rapidly varied คือ มีการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกในการไหลอย่างมีนัยสำคัญในระยะทางสั้นๆ นั่นเอง

1.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent flow)

ถ้าอนุภาคของของเหลว (liquid particle) มีการเคลื่อนที่แบบราบเรียบและการไหลที่ปรากฏเป็นการเคลื่อนที่ของชั้นบางๆ (thin layer) บริเวณด้านบน ดังนั้นการไหลจะถูกเรียกเป็น laminar flow ส่วน turbulent flow คือ การไหลที่ liquid particle เคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบมีความปั่นป่วนเกิดขึ้น โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการกำหนดการไหลว่าเป็นแบบ laminar หรือ turbulent นั้นขึ้นอยู่กับความหนืดและแรงเฉื่อย ถ้าแรงจากความหนืดมีลักษณะเด่นการไหลนั้นก็จะเป็นแบบ laminar แต่ถ้าแรงเฉื่อยเป็นลักษณะเด่น การไหลจะเป็นแบบ turbulent สัดส่วนของความหนืดและแรงเฉื่อย คือ เลขเรย์โนล์ (Renolds number, Re) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (1.2)

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} \tag{1.2}$$

สำหรับกรณีรางเปิดที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม สามารถหาค่า ได้จาก

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho VR_h}{\mu} \tag{1.3}$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

V = ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

R_h = รัศมีไฮดรอลิก (m)

μ = ความหนืดของของไหล $(Pa.s)$

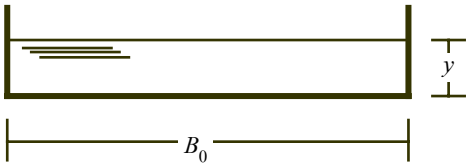
ซึ่ง R_h สำหรับรางเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยม สามารถหาได้จาก

$$R_h = \frac{B_0 y}{B_0 + 2y} \tag{1.4}$$

เมื่อ B_0 = ความกว้างของรางเปิด (m)

y = ความสูงของน้ำในรางเปิด (m)

ซึ่งค่า B_0 และ y สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงการหาค่า R_h จากรางเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยม
ที่มา : Chaudhry. M. H, 1993

โดยค่า Re ที่ทำให้มีการเปลี่ยนลักษณะการไหลจาก laminar เป็นแบบ turbulent นั้นเรียกว่า critical Renolds number (Re_c) และค่านี้จะแปรเปลี่ยนไปตามรูปร่างของช่องทางที่ของเหลวไหลผ่าน (Tilton, 1999) สำหรับกรณีช่องทางเปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular ducts) ค่า Re_c สามารถแสดงได้ดังนี้ $1{,}900 \geq Re_c \geq 2{,}800$ นั่นคือการไหลเป็นแบบ laminar เมื่อตัวเลข Re มีค่าตั้งแต่ 0-1,900 การไหลเป็นแบบ turbulent เมื่อตัวเลข Re มีค่าตั้งแต่ 2,800 ขึ้นไป และการไหลเป็นแบบ transition เมื่อตัวเลข Re อยู่ระหว่าง 1,900-2,800

2. แบบจำลองการถ่ายโอนมวล (Model of mass transfer)

กระบวนการถ่ายโอนมวลอันเนื่องจากสารที่มีขอบเขตติดต่อกันของผิวหน้าสัมผัสระหว่างวัฏภาคทำให้มีความยุ่งยากในการสังเกตหรือในการทดลอง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ขึ้น จากการศึกษาข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ ผลในการวิเคราะห์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับการวัดจากการทดลองซึ่งทำให้มีความเป็นไปได้ในการทำการศึกษากระบวนการการถ่ายโอนมวล ในบางครั้งสมการทางคณิตศาสตร์อาจให้ผลในการทำนายสอดคล้องกับความจริง สิ่งที่สำคัญที่สุดของการถ่ายโอนมวล คือ มีกระแสความปั่นป่วน (turbulent stream) เป็นตัวกำหนดความต้านทานในการถ่ายโอน ซึ่งแทนด้วยความหนาของขอบเขตบางๆ ที่บริเวณผิวหน้าสัมผัส และการต้านทานในการถ่ายโอนมวลมักนำเสนอในรูปสัดส่วนของความแตกต่างของฟลักซ์ในการถ่ายโอนค่าฟลักซ์ในการถ่ายโอนมวล (mass transfer flux) จะหยุดเมื่อถึงสมดุลระหว่างกระแสบัล์คและบริเวณผิวหน้าสัมผัส โดยทั่วไปค่าฟลักซ์ของการถ่ายโอนมวลมักแสดงในรูปความเข้มข้น การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายค่าฟลักซ์ของการถ่ายโอนมวลที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ แบบจำลองฟิล์มนิ่ง (stagnant-film model) ซึ่งมักใช้ทฤษฎีสองฟิล์มมาใช้ในการอธิบาย (two film theory) แบบจำลองในการทะลุทะลวง

(penetration model) และแบบจำลองชั้นขอบเขตของความปั่นป่วน (turbulent boundary-layer model) เป็นต้น

2.1 แบบจำลองฟิล์มนิ่ง (the stagnant-film model)

เมื่อมีของไหลไหลอยู่เหนือชั้นขอบเขตของวัฏภาค (phase boundary) ค่าความเร็วจำเพาะ (local velocity) จะเข้าใกล้ศูนย์ที่บริเวณผิวหน้าของของไหล โดยของไหลมีการสัมผัสแบบทันทีทันใดกับผิวหน้าที่ยึดติดอยู่กับที่ ที่สามารถกล่าวได้ว่าเป็นฟิล์มนิ่ง (stagnant film) โดยในความเป็นจริงแรงต้านการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสของชั้นขอบเขตของวัฏภาคและชั้นฟิล์มนิ่งบางๆ ที่อยู่ติดกับบริเวณผิวหน้าสัมผัสด้านบน ถ้าแผ่นฟิล์มบางๆ นั้นไม่มีการเคลื่อนที่การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการแพร่ของโมเลกุล แบบจำลองฟิล์มมีมาตั้งแต่ 70 ปีที่แล้วโดย (Nernst *et al*., 1904) ซึ่งแบบจำลองนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ทั้งในกรณีการถ่ายโอนมวลและพลังงาน โดยมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีสองฟิล์ม (Whitman, 1923) ซึ่งสมมุติว่ามีฟิล์มนิ่งสองฟิล์มอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของแหล่งน้ำและอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการแพร่ผ่านฟิล์มของไหลนิ่งคืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในของไหล ต่อความหนาของชั้นฟิล์มในของไหลนั้น ดังสมการ (1.5) และ (1.6) ซึ่งพบว่าทฤษฎีสองฟิล์มเป็นทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด (Rafson, 1998)

$$k_G = \frac{D_G}{\delta_G} \tag{1.5}$$

และ

$$k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \tag{1.6}$$

เมื่อ k_G, k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวตามลำดับ (m/s)

D_G, D_L = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลวตามลำดับ (m^2/s)

δ = ความหนาของฟิล์ม (m)

2.2 แบบจำลองการทะลุทะลวง (The penetration model)

ในแบบจำลองฟิล์มของ Higbie ในปี 1935 ได้กล่าวว่า โดยมากการทำงานของเครื่องมือที่มีการสัมผัสกัน ระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลวในระดับโรงงานนั้น จะมีการสัมผัสกันของทั้งสองวัฏภาค และเวลาที่ใช้ในการสัมผัสกันจะสั้นมาก ซึ่งความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสจะคงที่โดยสมมุติว่ามีกระแสวนจากของไหลบัล์คเข้ามายังบริเวณผิวสัมผัส โดยโมเลกุลที่แพร่จะเคลื่อนที่ไปไม่ถึงอีกด้านของชั้นฟิล์มบางๆ การแพร่แบบนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเพียงชั่วครู่ โดยอัตราการถ่ายโอนจะลดลงเมื่อเทียบกับเวลา และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลได้ดังสมการ

$$k = 2\sqrt{\frac{D}{\pi t}} \tag{1.7}$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (m^2/s)

t = เวลาสัมผัสเฉลี่ย (s)

จากสมการ จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่ทฤษฎีการเปลี่ยนผิว (The surface-renewal theory) เป็นส่วนสำคัญของทฤษฎีทะลุทะลวงที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Danckwerts ที่เสนอไว้ในปี 1951 ในขณะที่ Higbie ได้แสดงไว้ว่าที่เวลาเดียวกันจะเกิดการวนซ้ำของการสัมผัสของของไหลกับผิวสัมผัส ส่วน Danckwerts ได้ให้ช่วงที่กว้างขึ้นของเวลาซึ่งจะพิจารณาในกรณีที่ชิ้นส่วนของของไหล (fluid element) ที่ผิวสัมผัสถูกแทนที่ด้วยของไหลใหม่จากกระแสบัล์ค ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล แสดงดังสมการ (1.8) โดยทำนายว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล แนวคิดการเปลี่ยนผิวนี้ไม่นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถวัดได้โดยตรง

$$k = \sqrt{D\tau} \tag{1.8}$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (m^2/s)

τ = average residence time for an element in the interphase (s)

2.3 แบบจำลองชั้นขอบเขตการปั่นป่วน (The turbulent boundary-layer model)

แบบจำลองนี้เกี่ยวกับการถ่ายโอนระหว่างผิวหน้าสัมผัส ที่ถูกกำหนดให้อยู่กับที่หรือผนังกับกระแสของไหลที่มีความปั่นป่วนโดยไม่มีการเลื่อนหลุดของผนังเกิดขึ้นและของไหลจะมีการสัมผัสแบบทันทีทันใดกับผนัง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากแบบจำลองนี้จะคล้ายคลึงกับการศึกษาในเรื่องกลศาสตร์ของไหล นั่นคือเมื่อของไหลมีการไหลแบบราบเรียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถหาได้จาก

$$\frac{kL}{D} = 0.626\,\mathrm{Re}^{1/2}\,Sc^{1/3} \tag{1.9}$$

สำหรับของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{kL}{D} = 0.373\,Sc^{1/3}(\mathrm{Re}^{0.8} - 15500) \tag{1.10}$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (m^2/s)

L = เวลาสัมผัสเฉลี่ย (s)

Re = Renolds number (ไม่มีหน่วย)

Sc = Schmidt number (ไม่มีหน่วย)

Bunyakan (1998) พบว่าความสัมพันธ์เหล่านี้ใช้ทำนายค่า ผิดพลาดมากเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดเพราะว่าสมการเหล่านี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากการสมมุติให้มีการถ่ายโอนบนวัสดุผิวเรียบ

3. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและทฤษฎีสองฟิล์ม (Mass transfer coefficient and two film theory)

การระเหยของสารจากแหล่งน้ำเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลของสารจากแหล่งน้ำผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ ที่สภาวะการถ่ายโอนมวลมีค่าคงที่ (steady-state) สามารถอธิบายได้โดยใช้ ทฤษฎีสองฟิล์มของ Whitman ที่เสนอไว้ในปี 1923 ซึ่งใช้อธิบายการถ่ายโอนมวลของสารจากกระแสบัล์คของวัฏภาคหนึ่งเข้าสู่ชั้นขอบเขตของวัฏภาคหรือบริเวณผิวสัมผัสและจากนั้นจะถ่ายโอนสู่กระแสบัล์คของวัฏภาคที่สองต่อไป ลักษณะการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงต้านในการถ่ายโอนมวลขึ้นทั้งสองข้างของบริเวณผิวสัมผัส โดย Whitman ได้สมมุติว่าวัฏภาคของของเหลวที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และแยกจากวัฏภาคอากาศโดยชั้นฟิล์มบางๆ ของของเหลวและของอากาศ การถ่ายโอนมวลจะเกิดจากการแพร่ของโมเลกุลข้ามผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองและสมมุติว่าผิวสัมผัสอยู่ในสถานะคงตัว เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำ ทำให้สามารถหาอัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลาใดๆ ได้ดังสมการ

$$R_{VOCs} = K_{OL}a\left(C_{L,t} - \frac{HC_{G,t}}{RT} \right) \tag{1.11}$$

เมื่อ R_{VOCs} = อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลา t (mol/s)

$K_{OL}a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว (m^3/s)

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t (mol/m^3)

$C_{G,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคแก๊สที่เวลา t (mol/m^3)

H = ค่าคงที่เฮนรี่ $(atm.m^3/mol)$

R = ค่าคงที่สากลแก๊ส (Universal gas constant) $(atm.m^3/mol.K)$

a = พื้นที่ของการระเหย (m^2)

สำหรับรางเปิดที่เปิดสู่บรรยากาศนั้นพิจารณาได้ว่าความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคแก๊ส (C_G) จะมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว (C_L) ดังนั้นสมการ (1.11) สามารถลดรูปได้เป็น

$$R_{VOCs,t} = K_{OL}aC_{L,t} \tag{1.12}$$

เมื่อ $R_{VOCs,t}$ = อัตราการระเหยของ VOCs ที่เวลา t (mol/s)

$K_{OL}a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว (m^3/s)

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t (mol/m^3)

พื้นที่ของการระเหยจริงไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการไหลในรางตลอดเวลา ดังนั้นจึงเขียนพื้นที่การระเหยอยู่รวมกันกับ K_{OL} เป็น $K_{OL}a$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร การระเหยของ VOCs ที่เวลาใดๆ ที่ปริมาตรของสารละลาย สามารถสมมุติได้ว่ามีค่าคงที่ตลอดกระบวนการระเหย หรือในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลวน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรรวม สามารถหาอัตราการระเหยของ VOCs ได้จากการทำดุลมวลรอบระบบ โดยพิจารณาว่าให้สารละลายมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์และ VOCs หายไปจากระบบได้เนื่องจากกลไกการระเหยเท่านั้น ดังนั้นอัตราการระเหยของ VOCs สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_{VOCs,t} = -V\frac{dC_{L,t}}{dt} \tag{1.13}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลาย (m^3)

t = เวลาที่ใช้ (s)

$C_{L,t}$ = ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t (mol/m^3)

รวมสมการ (1.12) และสมการ (1.13) เข้าด้วยกัน แล้วทำการอินทิเกรตจากเวลาเท่ากับศูนย์ที่ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวเท่ากับ $C_{L,0}$ ถึงเวลา t ใดๆ ที่ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว เท่ากับ $C_{L,t}$ จะได้

$$\ln\frac{C_{L,t}}{C_{L,0}} = -\frac{K_{OL}a}{V}t \tag{1.14}$$

จากสมการ (1.14) จะพบว่า สามารถหาค่า $K_{OL}a$ ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln\frac{C_{L,t}}{C_{L,0}}$ กับ t ของการทดลองนั้นๆ คือ

$$K_{OL}a = -(slope)(V) \tag{1.15}$$

เมื่อทราบค่า $K_{OL}a$ ก็จะสามารถหาค่าอัตราการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำใดๆได้ดังสมการ (1.11)

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) **และค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส** (k_Ga)

จากทฤษฎีสองฟิล์มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร $(K_{OL}a)$ มีความสัมพันธ์อยู่กับสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La) และสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_Ga) และค่าคงที่ของเฮนรี่ ดังสมการ

$$\frac{1}{K_{OL}a} = \frac{1}{k_La} + \frac{RT}{Hk_Ga} \tag{1.16}$$

4.1 สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (k_La)

สามารถหาได้จากกระบวนการการระเหยของ VOCs ที่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลอยู่ในวัฏภาคของเหลว VOCs เหล่านี้จะมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำซึ่งก็คือ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ (H) สูง เมื่อ H มีค่าสูงๆ เทอมขวามือสุดของสมการ (1.16) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นสมการ (1.16) สามารถลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{OL}a} = \frac{1}{k_La} \tag{1.17}$$

จากสมการ (1.17) พบว่าสามารถหาค่า k_La ได้จากการวัด $K_{OL}a$ ของ VOC_S ที่มีค่า H สูงๆ Mackay (1983) พบว่า VOCs ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงกว่าหรือเท่ากับ $5\times10^{-3}\ atm/mol.m^3$ ตัวอย่างของ VOCs ในกลุ่มนี้ได้แก่ โทลูอีนและเบนซีนซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรี่ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็น $6.64\times10^{-3}\ atm/mol.m^3$ และ

$5.5\times10^{-3}\ atm/mol.m^3$ ตามลำดับโดยในการศึกษานี้จะเลือกวัด k_La จากการระเหยของโทลูอีนจากแหล่งน้ำเพราะเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

4.2 สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (k_Ga)

สามารถหาได้จากกระบวนการการระเหยของสารบริสุทธิ์ เพราะจะไม่มีเกรเดียนต์ของความเข้มข้นเกิดขึ้นจึงกล่าวได้ว่าไม่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการระเหยของสารบริสุทธิ์จะอยู่ในวัฏภาคแก๊สทั้งหมด อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการปฏิบัติจริงการระเหยของสารบริสุทธิ์ปริมาณมากๆ ในการทดลองในรางเปิดขนาดใหญ่ไม่สามารถกระทำได้จึงต้องศึกษาหา k_Ga จากการระเหยของ VOCs จากวัฏภาคของเหลวแทน โดยใช้ VOCs ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงซึ่งเป็นสารที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำๆ เมื่อ H มีค่าต่ำมากๆเทอมขวามือสุดของสมการจะมีค่าสูงกว่าเทอมแรกมากๆ ดังนั้นสมการ (1.16) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{K_{OL}a}=\frac{RT}{H.k_Ga} \tag{1.18}$$

หรือ

$$k_Ga=\frac{RT.K_{OL}a}{H} \tag{1.19}$$

จากสมการ (1.19) สามารถหาค่า k_Ga ได้จากการวัด $K_{OL}a$ ของ VOCs ที่มีค่าคงที่เฮนรี่ต่ำๆ Mackay (1983) พบว่า VOCs ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ VOCs ที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ $5\times10^{-6}\ atm/mol.m^3$ ตัวอย่างของ VOCs ในกลุ่มนี้ได้แก่ เมทานอล ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรี่ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็น $3.77\times10^{-6}\ atm/mol.m^3$ ดังนั้นในการศึกษานี้จะเลือกวัด k_Ga จากการระเหยของเมทานอลจากวัฏภาคของเหลว เพราะเมทานอลเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่อยู่ระหว่าง $5\times10^{-6}-5\times10^{-3}\ atm/mol.m^3$ ความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลจะมีอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจะสามารถวัดได้เฉพาะ $K_{OL}a$ โดยจะไม่สามารถวัด k_Ga และ k_La ของ VOCs ในกลุ่มนี้ได้เลยอย่างไรก็ตาม ก็ยังมีวิธีที่ใช้ทำนายหรือประมาณ k_Ga และ k_La สำหรับ VOCs เหล่านี้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสมบัติที่สำคัญๆ ของสาร เช่น น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion coefficient) เป็นตัวปรับแก้

5. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การแพร่โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลถูกสมมุติให้แปรเปลี่ยนกับสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังสมการ

$$k = aD^{n} \tag{1.20}$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสาร (m/s)

a = ค่าคงที่

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

n = ตัวเลขไร้หน่วย (number dimensionless)

โดยค่าของ n ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้ นั่นคือในแบบจำลองสองฟิล์ม (two-film model) ของ Lewis และ Whitman (1924) ค่า n จะเท่ากับ 1.0 ตามทฤษฎีการทะลุทะลวง(penetration theory) ของ Higbie (1935) ค่า n จะเท่ากับ 0.5 ตามทฤษฎีการเปลี่ยนผิว (surface - renewal theory) ของ Danckwerts (1951) เท่ากับ 0.5 จากสมการ (1.20) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a$ และ $k_G a$ กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ใดๆ ได้ดังนี้

$$k_L a = a_L D_L^{n} \tag{1.21}$$

และ

$$k_G a = a_G D_G^{n} \tag{1.22}$$

เมื่อ $k_L a$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (m^3/s)

$k_G a$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (m^3/s)

a_L, a_G = ค่าคงที่

D_L, D_G = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของเหลวและแก๊ส (m^2/s)

$$k_L a_{(VOC)} = k_L a_{(VOC,ref)} \left(\frac{D_{VOC-liquid}}{D_{VOC,ref-liquid}} \right)^n \quad (1.23)$$

และ

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

เมื่อ $k_L a_{(VOC)}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs (m^3/s)

$k_G a_{(VOC)}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs (m^3/s)

$k_L a_{(VOC,ref)}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs อ้างอิง (m^3/s)

$k_G a_{(VOC,ref)}$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs อ้างอิง (m^3/s)

$D_{VOC-liquid}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ในวัฏภาคของเหลว (m^2/s)

$D_{VOC,ref-liquid}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs อ้างอิงในวัฏภาคของเหลว (m^2/s)

$D_{VOC-gas}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ในวัฏภาคแก๊ส (m^2/s)

ความสัมพันธ์ตามสมการ (1.23) ถึง (1.24) ช่วยให้สามารถทำนาย $k_L a$ และ $k_G a$ ของ VOCs ใดๆ ที่ต้องการได้ ทำให้สามารถทำนายค่า $K_{OL} a$ ของ VOCs ใดๆ ได้จากค่า $k_L a$ และ $k_G a$ ตามสมการ (1.16) และสามารถหาค่า R_{VOCs} หรือ N_{VOCs} ของ VOCs ที่สนใจได้จากสมการ (1.11)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gualtieri (2003) ได้ศึกษาโมเดลเพื่อใช้อธิบายการถ่ายโอนมวลระหว่างน้ำและอากาศของบ่อตกตะกอนน้ำ และได้มีการศึกษาความเกี่ยวข้องกันของพฤติกรรมของของไหลกับค่าการระเหยไร้หน่วยของสารละลายที่ระเหยผ่านผิวหน้าของของไหล ซึ่งได้มีการใช้โมเดลทำนายค่าการถ่ายโอนโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองจาก flume chamber และ benthic chamber พบว่าลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการถ่ายโอนมวลซึ่งถือเป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาครั้งนี้ โดยโมเดลที่ใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมีทั้งหมด ดังนี้

1. โมเดลจาก Nakamura (1994) ซึ่งได้ประยุกต์ความคล้ายคลึงกันของทฤษฎี bottom shear stress (แรงเฉือนที่บริเวณด้านล่าง) และทฤษฎี turbulent heat and mass transfer ได้ว่า

$$K_{m-t} = \frac{2}{\pi} * n_1 * \sqrt{\lambda} * U * Sc^{-0.75} \qquad (1.25)$$

เมื่อ K_{m-t} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

n_1 = 0.109

λ = classic friction factor of Darcy Weisbach equation , นั่นคือ $\lambda=8*\tau_0/\rho*U^2$

U = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลบริเวณด้านบนของตะกอน (m/s)

Sc = Schmidt number (ไม่มีหน่วย)

2. โมเดลจากการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ของการถ่ายโอนมวลความร้อนสู่การแพร่ของสาร ตลอดจนการแพร่ผ่านชั้นขอบเขต จะได้สมการที่ใช้ทำนายการถ่ายโอนมวลของ Higashino และ Kanda (1999) ดังนี้

$$K_{m-t} = \frac{3*\sqrt{6}}{8*\pi} - * n_2 * \sqrt{\lambda} * U * Sc^{-0.66} \qquad (1.26)$$

เมื่อ K_{m-t} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

λ = classic friction factor of DarcyWeisbach equation, that is $\lambda=8*\tau_0/\rho*U^2$

U = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลบริเวณด้านบนของตะกอน (m/s))

Sc = the Schmidt number

n_2 = 0.1

3. โมเดลจากสมการต่างๆ กันของ Steinberger และ Hondzo(1990) ที่ได้ทำการศึกษาจนได้ค่าการถ่ายโอนมวลที่สัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วย นั่นคือค่า Reynolds number ดังนี้

$$K_{m-t} = (0.012 \pm A_1) * \frac{D_m}{h} * \mathrm{Re}^{0.89 \pm 0.42} Sc^{1/3} \qquad (1.27)$$

เมื่อ K_{m-t} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

D_m = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

Sc = the Schmidt number

A_1 = ± 0.001

h = ความสูงจากชั้นbed ถึงstirrer (m)

พบว่าสมการที่ใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเหล่านี้ จะให้ค่าจากการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองใน flume chamber มากกว่าใน benthic chamber

Mahmud *et al*., (2004) ได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนมวลของ VOCs จากระบบน้ำเสียผ่านเมมเบรนแบบ hollow fiber ในการศึกษาครั้งนี้ใช้คลอโรฟอร์มเป็นสารทดสอบ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ ให้คงที่เท่ากับ 23 ± 0.2 องศาเซลเซียส โดยใช้สมการในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสแก๊สของ Leveque (1928) คือ

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_m H} + \frac{1}{k_a H} \tag{1.28}$$

เมื่อ K_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (m/s)

k_a = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส (m/s)

k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (m/s)

k_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่เมมเบรน (m/s)

H = ค่าคงที่เฮนรี่

และสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว อ้างอิงจากของ Wickramasinghe (1992) คือ

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = kt \tag{1.29}$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของ VOC_S ที่เวลาเริ่มต้น (g/m^3)

C_t = ความเข้มข้นของ VOC_S ที่เวลา t (g/m^3)

k = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (m/s)

t = เวลา (s^{-1})

จากการทำนายพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว พบว่ามีข้อจำกัดในการใช้อยู่มาก ทำให้ได้ค่าที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง

Johansen *et al*., (2000) ได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนมวลของของไหลที่มีการเคลื่อนที่ด้วยลักษณะ free surface โดยใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนผิวเป็นพื้นฐาน ซึ่งใช้กันทั่วไปแต่ในการใช้งานของทฤษฎีนี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการมีค่าแรงเฉือนระหว่างผิวหน้า(interface shear stress) ต่ำ โดยทำการศึกษาในเซลล์ทดสอบ (test cell) ซึ่งเป็นรูปทรงกระบอก มีความเร็วในการไหลของของไหลเท่ากับ U และได้โมเดลสำหรับลักษณะ free surface ดังนี้

$$\frac{k}{U} \approx 1.56513 * \mathrm{Re}^{-0.65143} * Sc^{-0.5*(1+0.4078*\exp(-0.03909*\ln(\mathrm{Re})^2))} \qquad (1.30)$$

ค่าปรับแก้ $\mathrm{Re}^{-0.65143} * Sc^{-0.5*(1+0.4078*\exp(-0.03909*\ln(\mathrm{Re})^2))}$ เป็นผลมาจากการใช้ค่าการกระจายของความหนืด (viscous flow description) เข้ามาเกี่ยวข้อง

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)

U = ความเร็วเฉลี่ย (m^-)

Re = Reynolds number (ไม่มีหน่วย)

Sc = Schmidt number (ไม่มีหน่วย)

Pertler *et al.,* (1995) ได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนมวลของระบบ โทลูอีน อะซีโตน น้ำ โดยได้ทำการทดลองใน measuring cell ที่มีขนาดกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ $4\times30\times60\ mm^3$ ที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารที่ใช้ทดลอง พบว่าที่สภาวะความหนาแน่นของสารมีค่าคงที่ และมีค่าที่เด่นชัดของปรากฏการณ์การไหลวน (eddies) มี

ผลทำให้การถ่ายโอนมวลของสาร ที่ผ่านบริเวณชั้นขอบเขตของสารเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีสองฟิล์ม (two film theory)

Dewulf *et al.,* (1998) ได้ทำการศึกษาความเร็วในการถ่ายโอนในวัฏภาคของเหลวระหว่างอากาศกับน้ำของ VOCs ทั้งหมด 13 ชนิด โดยทำการทดลองในถังกวนระดับห้องปฏิบัติการที่มีความลึก 30 cm และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 cm และกวนให้ของเหลวไหลด้วยความเร็วที่ระบุเป็นตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ Re เป็นไปตามสมการ

$$k_{L(VOC)} = \exp(8.15x10^{-5} * \mathrm{Re} + 0.736) \qquad (1.31)$$

เมื่อ $k_{L(VOC)}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวของ VOC (m/s)

Re = Reynolds number

โดยทั่วๆ ไปในการนำสมการไปใช้งานจริงๆ หากระบบมีความแตกต่างออกไปจำเป็นต้องใช้ค่าปรับแก้ เพื่อให้สมการสามารถทำนายได้ใกล้เคียง กับความเป็นจริงมากที่สุด และในการศึกษาของ Dewulf นี้เลือกใช้ค่าปรับแก้ของการแพร่และการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนเข้ามาปรับแก้ ดังนี้

$$\frac{k_{L(VOC)}}{k_{L(O_2)}} = \left(\frac{D_{VOC}}{D_{O_2}} \right)^n \qquad (1.32)$$

เมื่อ $k_{L(VOC)}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวของ VOCs (m/s)

$k_{L(O2)}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวของ O_2 (m/s)

D_{VOC} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC (m^2/s)

D_{O2} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ O_2 (m^2/s)

n = 0.5-1

Lunney *et al.,* (1985) ได้ศึกษาผลของความลึกของแหล่งน้ำและความเร็วลมต่อ k_L โดยการระเหยเอทิลอีเทอร์ (Ethyl ether) ในช่วงความเร็วลม 0-8.09 m/s และที่ความลึกต่างๆ โดยผลของความลึกต่อ k_L ได้ถูกศึกษาในเทอมของค่า F/D เมื่อ F คือเส้นทะแยงมุมของถัง

ระเหย และ D คือความลึกของแหล่งน้ำ พบว่าที่ความเร็วลมต่ำๆ และทุกๆ อัตราส่วน F/D นั้น k_L จะมีค่าคงที่และที่อัตราส่วน F/D อยู่ในช่วง 14-50 นั้นพบว่า k_L แปรผันโดยตรงกับอัตราส่วน F/D และความเร็วลมยกกำลังสอง แต่ k_L จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน F/D เมื่อ F/D มีค่ามากกว่า 50 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปประมาณค่า k_L ของ VOCs อื่นได้ โดยใช้อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs ที่สนใจต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเอทิลอีเทอร์ แสดงดังสมการ

$$k_L = 2.78\times10^{-6}\left(\frac{D_{i-water}}{D_{ethyl-water}}\right)^{0.5} \tag{1.33}$$

สำหรับ $0 \le U_{10} < 5 \;\; m/s$ และทุกๆ อัตราส่วน F/D

$$k_L = 2.60\times10^{-9}(F/D) + 1.277\times10^{-7}U_{10}^{2}\left(\frac{D_{i-water}}{D_{ethyl-water}}\right)^{2/3} \tag{1.34}$$

สำหรับ $U_{10} > 5 \;\; m/s$ และ $14 \le F/D \le 50$

$$k_L = 2.61\times10^{-7}U_{10}^{2}\left(\frac{D_{i-water}}{D_{ethyl-water}}\right) \tag{1.35}$$

สำหรับ $U_{10} > 5 \;\; m/s$ และ $F/D \ge 50$

โดยที่

$$U_{10} = U_{0.1}\left(\frac{10}{0.1}\right)^{1/7} \tag{1.36}$$

เมื่อ k_L = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (m/s)

U_{10} = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 10 เมตร (m/s)

$U_{0.1}$ = ความเร็วลมเหนือระยะผิวน้ำ 0.1 เมตร (m/s)

F/D = อัตราส่วนของเส้นทแยงมุมของถังระเหยต่อความลึกของแหล่งน้ำ (m/m)

$D_{i-water}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบในน้ำ (m^2/s)

$D_{ethylether}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของเอทิล อีเทอร์ในน้ำ (m^2/s)

David *et al.,* (2000) ได้ศึกษาโมเดลเพื่อใช้สำหรับประมาณการระเหยของ VOCs จากท่อระบายน้ำทิ้งของท่อใต้ดิน (underlying channel) ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม โดยการจำลองแบบท่อระบายน้ำทิ้งและได้เปรียบเทียบค่า $k_L A_C$ ที่วัดได้ระหว่างท่อระบายแบบซีล (seal drain) กับท่อแบบไม่ซีล (open drain) โดยการระเหยของ VOCs 5 ชนิด ได้แก่อะซีโตน เอทิลอะซีโตน โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซโคลเบนซีน พบว่าค่า $k_L A_C$ ของท่อไม่ซีลอยู่ในช่วง 1.9-14.4 $L/\min$ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 $L/\min$ และท่อซีลมีค่า $k_L A_C$ อยู่ในช่วง 2.9-4.9 $L/\min$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.1 $L/\min$ อย่างไรก็ตาม $k_L A_C$ ที่วัดได้อยู่ในช่วงแคบๆ และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า $k_L A_C$ สำหรับการทดลองนี้คือ อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำ และผลจากการทดลองนำไปพัฒนาเป็นสมการทั่วไปเพื่อใช้สำหรับการประมาณการระเหยของ VOC โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มเป็นพื้นฐาน ดังสมการ

$$k_L A_C = [-1350(V_1 - 0.249)^2 + 149.5](Sc)^{0.5} \tag{1.37}$$

โดย $0.0 < V_1 < 0.5 m/s$ (open drain)

$$k_L A_C = 64.4(Sc)^{0.5} \tag{1.38}$$

โดย $V_1 \le 0.5 m/s$ (open drain)

$$k_L A_C = 205 V_1^{0.435}(Sc)^{0.5} \tag{1.39}$$

โดย $0.0 < V_1 < 0.5 m/s$ (seal drain)

เมื่อ $k_L A_C$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในท่อ $(L/\min)$

V_1 = ความเร็วของของเหลว $(L/\min)$

Sc = เลขของ Scmidt

Koziel *et al.,* (2001) ได้ทำการศึกษาการระเหยของ VOCs จากระบบท่อระบายน้ำเสียของโรงงาน (Sewer) โดยทำการทดลองในแบบจำลองท่อระบายน้ำที่มีความยาว 60 เมตร กว้าง 0.2 เมตร การทดลองใช้ VOCs 5 ชนิด ได้แก่ อะซีโตน เอทิลอะซีโตน โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซโคล

เฮกเซน จากผลการทดลองมีการนำข้อมูลมาใช้กับสมการที่ได้รับการพัฒนาแล้ว ของ Parkhurst-Pomeroy (PP) (1972) มาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (k_L) ดังนี้

$$k_L = 0.000267\left(\frac{D_{LVOC}}{D_{LOX}}\right)^n \gamma\left(1+F^2\right)\left(U_{liq}S\right)^{3/8} \tag{1.40}$$

โดยได้มีการเปรียบเทียบกับการใช้สมการของ Owen *et al.*, (1964) [Owens, Edwards and Gibbs (OEG)] คือ

$$k_L = 0.000976\left(\frac{D_{LVOC}}{D_{LOX}}\right)^n \gamma\left(U_{liq}^{0.67} d^{0.85}\right) \tag{1.41}$$

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเฟสแก๊ส หาได้จาก

$$K_L = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_g H_C}\right)} \tag{1.42}$$

เมื่อ K_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของระบบ (m/s)

k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (m/s)

k_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส (m/s)

D_{lVOC} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของสารในวัฏภาคของเหลว (m^2/s)

D_{lOX} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของออกซิเจนสารในวัฏภาคของเหลว (m^2/s)

γ = ค่าปรับแก้ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ = $1.024^{T_{liq}-20}$

T_{liq} = อุณหภูมิของน้ำเสีย (^0C)

F = Froude number = $U_{liq}/\sqrt{(gd)}$

U_{liq} = ความเร็วเฉลี่ยของน้ำเสีย (m/s)

g = ค่าคงที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วง = $9.81\,(m/s^2)$

d = mean hydraulic depth flow (m)

S = slope of energy gradient (m/m)

พบว่าสมการ OEG สามารถแสดงผลได้ว่าวัฏภาคของเหลวเป็นวัฏภาคที่ต้านทานการถ่ายโอนมวลของระบบและสมการ PP ก็ให้ผลเช่นเดียวกันคือ วัฏภาคของเหลวเป็นวัฏภาคที่ต้านทานการถ่ายโอนมวลของระบบเช่นกัน สำหรับการถ่ายโอนในวัฏภาคแก๊สมีความสำคัญเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในกรณีนี้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของความเร็วในการไหลของน้ำในรางเปิดจำลองต่อค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs
2. พัฒนาสมการเอ็มพิริคัล (empirical) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สมการเอ็มพิริคัลของสัมประสิทธิ์ฟิลม์แก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิลม์ของเหลวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาอัตราการระเหยของ VOCs จากการไหลในรางเปิดได้
2. นำไปสู่การหาวิธีป้องกันการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากรางเปิดต่อไป