

บทที่ 3

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยจากน้ำเสีย

จรัญ บุญกาญจน์¹ แสนสุข แซ่ฮึ้ง² จรรยา อินทมณี³ และ จันทิมา ชั่งสิริพร⁴

Abstract

Bunyakan, C., Seaoung, S., Intamane, J., and Chungsiriporn, J.

Mass Transfer Coefficient for Volatilization of Volatile Organic Compounds from Wastewater

Volatilization of volatile organics compounds (VOCs) from wastewater is recognized as an important source that caused air pollution today. In air pollution management regarding VOCs emission to atmosphere, the amount of VOCs that released from wastewater need to be known. The model for predicting of VOCs volatilized from wastewater is then necessary. The aim of this research is to develop the gas-film ($k_{g,a,VOC}$) and liquid-film ($k_{l,a,VOC}$) mass transfer coefficient from volatilization of VOCs from wastewater. The volatilization experiments were performed in a pilot volatilization tank with a volume of 100 L. The wind speed over the water surface, measured at 10 cm above water surface (U_{10cm}), is the main parameter which investigated in this work. The U_{10cm} were varied from 0 to 4.42 m s⁻¹. VOCs used in this investigation were methanol toluene and methyl ethyl ketone.

The results revealed that the gas-film coefficient of methanol increased linearly with increasing U_{10cm} over the investigated range of U_{10cm} where as the liquid-film coefficient of toluene fell into two regimes with a break at the U_{10cm} of 2.4 m/s. The correlations of $k_{g,a,VOC}$ and $k_{l,a,VOC}$ were developed from gas-film and liquid-film coefficient of methanol and toluene, respectively, and verified by predicting overall mass transfer coefficient ($K_{OL}a$) of MEK. It was found that the correlations of $k_{g,a,VOC}$ and $k_{l,a,VOC}$ predicted the mass transfer coefficient of MEK volatilized from wastewater quite well but under estimated that of pure water. Since the mass transfer coefficient of VOCs volatilized from pure water were significant higher than that of wastewater as found in this work. The $k_{g,a,VOC}$ and $k_{l,a,VOC}$ developed based on wastewater is recommended for prediction of VOCs emission rate from wastewater rather than the correlation previously developed based on pure water.

Key words: VOCs, Volatilization, Mass Transfer Coefficient, MEK, Toluene, Methanol

¹Ph.D. (Chemical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ²วท.บ. (อุตสาหกรรมเกษตร) นักศึกษา วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต ³วท.บ. (เคมี) ครูชำนาญการ ⁴วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี) อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail: charun.b@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การระเหยของสารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) จากน้ำเสียเป็นแหล่งก่อกมลพิษทางอากาศที่สำคัญ ในการจัดการมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องกับการปล่อย VOCs สู่อากาศ จำเป็นต้องทราบปริมาณของ VOCs ที่ปล่อยจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วย แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายปริมาณการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจึงเป็นสิ่งจำเป็น การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ($k_{G,a,VOC}$) และสมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ($k_{L,a,VOC}$) จากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจริง โดยทำการทดลองในถังระเหยปริมาตร 100 L ตัวแปรหลักที่ศึกษาคือความเร็วลมเหนือผิวน้ำ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระยะ 10cm เหนือผิวน้ำ (U_{10cm}) ที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 0-4.42 $m\ s^{-1}$ และ VOCs ที่ใช้ในการศึกษาคือ เมทานอล ทูโลอิน และ เมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone, MEK)

ผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลเพิ่มขึ้นกับ U_{10cm} ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตลอดช่วงของ U_{10cm} ที่ศึกษา ในขณะที่สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทูโลอินแบ่งออกเป็นสองช่วงโดยมีจุดเปลี่ยนที่ U_{10cm} เท่ากับ 2.4 $m\ s^{-1}$ สมการของ $k_{G,a,VOC}$ และสมการของ $k_{L,a,VOC}$ ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการระเหยของเมทานอลและของทูโลอินจากน้ำเสียตามลำดับและได้ตรวจสอบความถูกต้องของสมการดังกล่าวโดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสีย ($K_{OL,a}$) ผลการตรวจสอบพบว่าสมการ $k_{G,a,VOC}$ และ $k_{L,a,VOC}$ ที่พัฒนาขึ้นจากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียทำนาย $K_{OL,a}$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียได้ดีแต่ทำนาย $K_{OL,a}$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง เนื่องจากผลการศึกษานี้พบว่า $K_{OL,a}$ ของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์มีค่าสูงกว่า $K_{OL,a}$ ของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำเสียมาก สมการ $k_{G,a,VOC}$ และสมการ $k_{L,a,VOC}$ ที่พัฒนาขึ้นจากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจริงในการศึกษานี้ จึงเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียมากกว่าการใช้สมการที่พัฒนาขึ้นมาจากการระเหยของ VOCs จากน้ำบริสุทธิ์ที่มีรายงานไว้ทั่วไป

บทนำ

สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) เป็นสารเคมีที่มีใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการผลิตสี อุตสาหกรรมพลาสติกและพอลิเมอร์ และอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น นอกจากจะใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ข้างต้นแล้วพบว่ายังมีการใช้ VOCs ในกิจกรรมอื่นๆ ที่อยู่ใกล้ตัวเรามาก ได้แก่ การเคลือบผิว เช่น ตู้เคาะพ่นสีรถยนต์ และโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ การกำจัดสารหล่อลื่น เช่น การใช้ตัวทำละลายเพื่อล้างชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรในการซ่อมบำรุงของโรงงาน อุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ การผลิตสิ่งพิมพ์ เช่น การพิมพ์หนังสือ การพิมพ์บรรจุภัณฑ์ และการพิมพ์สื่อโฆษณาต่างๆ การซักแห้ง และการเก็บและจ่ายผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น คลังน้ำมันและสถานีบริการน้ำมัน เป็นต้น การดำเนินการในอุตสาหกรรมหรือกิจกรรมข้างต้นจะส่งผลให้มีการปนเปื้อนของ VOCs ในน้ำใช้ในกระบวนการซึ่งในที่สุด VOCs ส่วนหนึ่งก็จะถูกถ่ายโอนไปอยู่ในน้ำเสียของโรงงาน อุตสาหกรรม หรือในน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียของชุมชน ดังนั้นการระเหยของ VOCs จากระบบบำบัดน้ำเสียจึงเป็นแหล่งกำเนิดของมลพิษทางอากาศที่สำคัญและได้มีการศึกษาเรื่องนี้กันมาเป็นเวลานานกว่า 20 ปี และยังมีการศึกษาวิจัยเรื่องนี้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปัจจุบัน (Hwang, 1981; Mackay et al., 1983; Corsi, 1991; Sedek et al., 1996; Aneja et al., 2001; Escalas et al., 2003; Lin et al., 2004) การระเหยของ VOCs จากระบบบำบัดน้ำเสียมีผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตทั้งคน สัตว์ และพืชโดยตรง โดยความรุนแรงเนื่องจากความเป็นพิษของ VOCs ต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของ VOCs ที่ระเหยสู่อากาศและขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สิ่งมีชีวิตสัมผัสกับ VOCs ด้วย การที่จะต้องทราบถึงปริมาณของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำเสียในช่วงเวลาใดที่สนใจจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการหาแนวทางเพื่อป้องกันมลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสีย

การระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากน้ำเสีย

อัตราการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากน้ำเสียเช่นจากบ่อบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ สามารถวัดได้โดยตรงโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าฟลักซ์แชมเบอร์ (flux chamber) หรือใช้วิธีประมาณโดยการคำนวณจากความเข้มข้นของ VOC ในน้ำเสีย วิธีหลังจะนิยมมากกว่าวิธีแรกเพราะสามารถทำนายอัตราการระเหยของ VOC เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปได้สะดวกกว่า วิธีการคำนวณอัตราการระเหยของ VOC ที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันมานานคือการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสองฟิล์มของ Whitman (อ้างโดย Treybal, 1980) อัตราการระเหยของ VOC จากน้ำเสียแสดงได้ดังสมการ

$$R_{VOC} = K_{OL} a_{VOC} C_{VOC} \quad (1)$$

เมื่อ R_{VOC} คืออัตราการระเหยของ VOC จากน้ำเสีย (mol s^{-1}) C_{VOC} คือความเข้มข้นของ VOC นั้นๆ ในน้ำเสีย (mol m^{-3}) $K_{OL} a_{VOC}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว และค่าคงที่เฮนรี่ของ VOC ตามสมการ (2)

$$\frac{1}{K_{OL}a_{,VOC}} = \frac{1}{k_L a_{,VOC}} + \frac{RT}{Hk_G a_{,VOC}} \quad (2)$$

เมื่อ $k_{L,a,VOC}$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ($m^3 s^{-1}$) $k_{G,a,VOC}$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ($m^3 s^{-1}$) H คือค่าคงที่เฮนรีของ VOC ($atm m^3 mol^{-1}$) T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ R คือค่าคงที่สากลของแก๊ส ($atm m^3 mol^{-1} K^{-1}$) แม้ว่านักวิจัยหลายท่านได้เสนอสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสำหรับใช้หาค่า $K_{OL}a_{,VOC}$ ไว้หลายรูปแบบแต่สมการที่มีอยู่ทั้งหมดถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการระเหยของ VOC จากน้ำบริสุทธิ์ (Mackay and Yeun, 1983; Lunney et al., 1985; Liss and Merlivat, 1986; Bunyakan et al., 2001;) ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปน้ำเสียจริงมาก Buanyakan et al (2005) พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ MEK ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณของของแข็งแขวนลอย (suspended solid) ในน้ำเสีย ดังนั้นการใช้สมการ $k_{L,a,VOC}$ และ $k_{G,a,VOC}$ ที่พัฒนาขึ้นมาจากการระเหยของ VOCs จากน้ำบริสุทธิ์มาทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำเสียจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ที่สูงกว่าความเป็นจริง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อพัฒนาสมการ $k_{L,a,VOC}$ และ $k_{G,a,VOC}$ ขึ้นมาใหม่โดยทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวโดยการทดลองระเหย VOCs จากน้ำเสียจริง วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของสมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ได้จากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจริง สมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ได้จากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจริงจะสามารถนำไปใช้ทำนายการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียได้

ทฤษฎีและหลักการ

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม, $K_{OL}a_{,VOC}$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำเสียใช้วิธีการเดียวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมจากการระเหยของ VOCs จากน้ำ ที่ได้รายงานไว้ทั่วไป (Bunyakan et al., 2001) โดยที่ $K_{OL}a_{,VOC}$ สามารถหาค่าได้จากข้อมูลความเข้มข้นของ VOCs ในระบบที่ศึกษาที่เวลาต่างๆ ดังสมการ (3)

$$-\ln \frac{C_{VOC}}{C_{VOC,0}} = \frac{K_{OL}a_{,VOC}}{V} t \quad (3)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของน้ำเสียที่มี VOC ละลายอยู่ (m^3) $C_{VOC,0}$ คือความเข้มข้นของ VOC ในน้ำเสียที่เวลาเริ่มต้น ($mol m^{-3}$) C_{VOC} คือความเข้มข้นของ VOC ในน้ำเสียที่เวลาใดๆ ($mol m^{-3}$) และ t คือเวลาที่ใช้ในการระเหยของ VOC จากสมการ (3) สามารถหาค่า $K_{OL}a_{,VOC}$ ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $-\ln(C_{VOC}/C_{VOC,0})$ กับ t คือ

$$K_{OL}a_{,VOC} = VS \quad (4)$$

เมื่อ S คือความชันของกราฟ (s^{-1}) ดังนั้นโดยการวัดความเข้มข้นของ VOCs ที่เวลาต่างๆ ตลอดกระบวนการระเหยภายใต้สภาวะที่สนใจ ก็จะสามารถหาค่า $K_{OL,a,VOC}$ ภายใต้สภาวะนั้นได้

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, $k_{G,a,VOC}$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สหาค่าได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงหรือมีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำโดยที่ $H < 5 \times 10^{-6} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ (Mackay et al., 1979) ในการทดลองนี้เลือกวัดสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สจากการระเหยของเมทานอลจากน้ำเสียความเข้มข้นระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของเมทานอลกับสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลดังสมการ (5)

$$k_{G,a,MeOH} = \frac{RTK_{OL,a,MeOH}}{H} \tag{5}$$

เมื่อ $k_{G,a,MeOH}$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอล ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) $K_{OL,a,MeOH}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของเมทานอล ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) H คือค่าคงที่เฮนรีของ VOC ($\text{atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$) T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ R คือค่าคงที่สากลของแก๊ส ($\text{atm m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) จากสมการที่ (5) ในการหาค่า $k_{G,a,MeOH}$ สำหรับการระเหยของเมทานอลจากน้ำเสียจำเป็นต้องทราบค่า H ของเมทานอลในน้ำเสียซึ่งไม่มีข้อมูลรายงานไว้และในการศึกษานี้ไม่ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า H จึงยังคงใช้ค่า H ที่ได้จากการศึกษาโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ที่มีรายงานไว้ทั่วไป (Zierold, 1996) แม้ว่าค่า H ที่ใช้ยังเป็นค่าที่ได้จากน้ำบริสุทธิ์ แต่การใช้ค่า $K_{OL,a,MeOH}$ ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจะทำให้ค่า $k_{G,a,MeOH}$ ที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่า $k_{G,a,VOC}$ ของ VOC ใดๆ ที่สนใจได้ โดย $k_{G,a,VOC}$ สามารถหาค่าได้โดยใช้เมทานอลเป็นสารอ้างอิงและใช้สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวปรับแก้ตามวิธีที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Bunyan, 1998)

$$k_{G,a,VOC} = k_{G,a,MeOH} \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{MeOH-air}} \right)^n \tag{6}$$

เมื่อ $k_{G,a,VOC}$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) $D_{VOC-air}$ และ $D_{MeOH-air}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOCs และของเมทานอล ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) ในอากาศ ตามลำดับ n คือค่าคงที่ สำหรับทฤษฎีฟิล์มของ Whitman (อ้างโดย Treybal, 1980) n มีค่าเท่ากับ 1.0

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, $k_{L,a,VOC}$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวหาค่าได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC ที่มีมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำซึ่งก็คือ VOC ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูง ($H > 5 \times 10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$) (Mackay et al., 1979) ในการทดลองนี้เลือกวัดสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวจากการระเหยของทูลอีนจากน้ำเสีย ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของทูลอีนกับสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทูลอีนแสดงดังสมการ (7)

$$k_{L,a,Toluene} = K_{OL,a,Toluene} \tag{7}$$

เมื่อ $k_L a_{Toluene}$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทูลอีน ($m^3 s^{-1}$) $K_{OL} a_{Toluene}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของทูลอีน ($m^3 s^{-1}$) เมื่อได้ค่า $k_L a_{Toluene}$ ก็สามารถหาค่า $k_L a_{VOC}$ ได้โดยใช้ทูลอีนเป็นสารอ้างอิงและใช้สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวปรับแก้ตามวิธีที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Bunyan, 1998) จะได้ว่า

$$k_L a_{VOC} = k_L a_{Toluene} \left(\frac{D_{VOC-water}}{D_{Toluene-water}} \right)^n \quad (8)$$

เมื่อ $k_L a_{VOC}$ คือสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ($m^3 s^{-1}$) $D_{VOC-water}$ และ $D_{Toluene-water}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของ VOC และของทูลอีน ($cm^2 s^{-1}$) ในน้ำ ตามลำดับ และ n คือค่าคงที่ สำหรับทฤษฎีฟิล์ม n มีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อทราบค่า $k_G a_{VOC}$ และ $k_L a_{VOC}$ แล้วจะสามารถทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC ใดๆ ได้โดยใช้สมการ (2) และจะสามารถทำนายอัตราการระเหยและฟลักซ์การระเหยของ VOC ได้ดังสมการ (1) และสมการ (9) ตามลำดับ

$$N_{VOC} = \frac{R_{VOC}}{A} \quad (9)$$

เมื่อ N_{VOC} คือฟลักซ์การระเหยของ VOC จากน้ำเสีย ($mol s^{-1} m^2$) R_{VOC} คืออัตราการระเหยของ VOC จากน้ำเสีย ($mol s^{-1}$) และ A คือพื้นที่ของการระเหย (m^2)

อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษาการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียกระทำในชุดทดลองขนาดต้นแบบที่ประกอบด้วยถังระเหย (ขนาดยาว 1 m กว้าง 0.5 m และสูง 0.2 m) และระบบจำลองกระแสลมโดยใช้พัดลมขนาดใหญ่ที่สามารถส่งอากาศได้สูงสุดถึง 3000 CFM ติดตั้งอยู่เหนือผิวน้ำที่ปลายด้านหนึ่งของถังระเหยดังแสดงใน Figure 1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียคือความเร็วลมเหนือผิวน้ำการศึกษานี้จึงให้ความสนใจกับปัจจัยดังกล่าวเป็นหลัก การศึกษานี้ใช้ความเร็วลมที่ 10cm/วินาทีเป็นจุดอ้างอิง ทำการวัดความเร็วลมที่ระดับอ้างอิงนี้จำนวน 15 จุดกระจายทั่วผิวน้ำและหาค่าเฉลี่ย ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระยะ 10cm (U_{10cm}) ที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 0-4.42 $m s^{-1}$ ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิของอากาศมีค่าคงที่ในช่วง $29 \pm 1^\circ C$ และ $31 \pm 1^\circ C$ ตามลำดับ ค่า BOD₅, COD และ SS ของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 50-98 $mg L^{-1}$, 2320-2960 $mg L^{-1}$ และ 27-38 $mg L^{-1}$ ตามลำดับ VOCs ที่ใช้ในการศึกษาคือ เมทานอล ทูลอีน และ เมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone, MEK) เมทานอลถูกเลือกใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส ทูลอีนถูกเลือกใช้เพื่อหาสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว และ MEK ถูกเลือกเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวเพราะความต้านทานต่อการระเหยของ MEK จากน้ำเสียมีอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ VOCs ในน้ำเสียที่ใช้แสดงดัง Table 1 ถึง Table 3

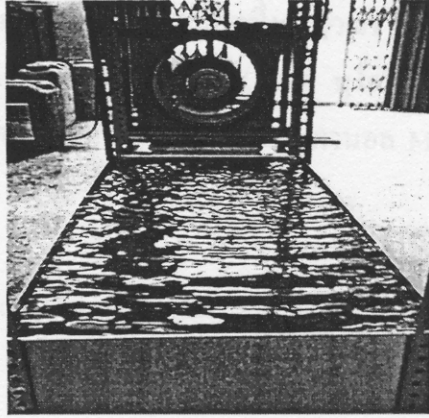


Figure 1 Pilot volatilization tank equipped with a wind generated system

การทดลองเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลาย VOC ในน้ำเสียให้มีความเข้มข้นตามต้องการและมีปริมาตรของน้ำเสียรวมเท่ากับ 100 L เดิมสารละลายที่ผสมกันดีแล้วลงในถังระเหย เก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ VOC เริ่มต้น เปิดพัดลมให้มีกระแสลมพัดผ่านผิวน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังระเหยตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ VOC ที่เวลาใดๆ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของ VOC ในน้ำเสียใช้แก๊สโครมาโทกราฟี (model HP9806, Hewlett Packard) โดยมีสภาวะสำหรับการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิของอินเจกเตอร์ (injector) เท่ากับ 180°C อุณหภูมิของดีเทกเตอร์ (Detector) เท่ากับ 200°C และอุณหภูมิคอลัมน์เท่ากับ 50°C คอลัมน์ที่ใช้เป็น capillary คอลัมน์ (HP-FAAP, Polyethylene glycol-TPA modified, Hewlett Packard) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ยาว 30 m. อัตราการไหลของฮีเลียมเท่ากับ 0.2 mL min^{-1} นำข้อมูลความเข้มข้นรวมของ VOC ที่เปลี่ยนไปกับเวลามาใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมตามสมการ (3) หาสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สจากสมการ (6) และหาสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวจากสมการ (8) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส และสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC และตรวจสอบความถูกต้องของสมการดังกล่าว

ผลการทดลองและวิจารณ์

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC, $K_{OL}a_{VOC}$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC ในกระบวนการระเหยจากน้ำเสียที่สภาวะการทดลองต่างๆ หาค่าได้จากการวัดความเข้มข้นของ VOC ในน้ำเสียที่เวลาต่างๆ แล้วทำการแปลผลจากข้อมูลของความเข้มข้นเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมโดยใช้สมการ (3) Figure 2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของกราฟที่พล็อตระหว่าง $-\ln(C_{VOC}/C_{VOC,0})$ กับ t สำหรับการระเหยของเมทานอล MEK และทูลูอินจากน้ำเสียที่ความเร็วลมเหนือผิวน้ำเท่ากับ 2.81 m s^{-1} จาก Figure 2 ความชันของกราฟ $-\ln(C_{VOC}/C_{VOC,0})$ กับ t ของเมทานอล เมทิลเอทิลคีโตน และทูลูอินเท่ากับ 5.535×10^{-4} , 1.553×10^{-3} และ $2.532 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ในขณะที่ปริมาตรของน้ำเสียในถัง

ระเหยเท่ากับ 0.1 m^3 ดังนั้น $K_{OLa_{VOC}}$ ภายใต้สภาวะดังกล่าวซึ่งคำนวณจากสมการ (4) คือ 9.23×10^{-7} , 2.59×10^{-6} และ $4.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ การหาค่า K_{OLa} ของเมทานอล MEK และ ทูโลอินที่สภาวะการทดลองอื่นๆ ใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเช่นเดียวกันกับที่ได้แสดงข้างต้น ค่า K_{OLa} ของเมทานอล MEK และของทูโลอินที่ความเร็วลมต่างๆ แสดงเปรียบเทียบกันใน Figure 3

Table 1 Experimental conditions for studying the influence of wind speed on volatilization rate of methanol from wastewater

Run No.	$U_{10cm} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$T_{\text{water}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	Initial concentration of methanol in wastewater (mg L^{-1})
1	0.00	29 ± 1	1330
2	0.43	29 ± 1	1259
3	1.86	29 ± 1	1164
4	2.40	29 ± 1	1376
5	2.81	29 ± 1	1053
6	3.43	29 ± 1	1236
7	4.42	29 ± 1	1068

Table 2 Experimental conditions for studying the influence of wind speed on volatilization rate of toluene from wastewater

Run No.	$U_{10cm} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$T_{\text{water}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	Initial concentration of methanol in wastewater (mg L^{-1})
8	0.00	29 ± 1	269
9	0.43	29 ± 1	280
10	1.86	29 ± 1	259
11	2.40	29 ± 1	268
12	2.81	29 ± 1	228
13	3.43	29 ± 1	249
14	4.42	29 ± 1	268

Table 3 Experimental conditions for studying the influence of wind speed on volatilization rate of MEK from wastewater

Run No.	U_{10cm} ($m s^{-1}$)	T_{water} ($^{\circ}C$)	Initial concentration of MEK in wastewater ($mg L^{-1}$)
15	0.00	29 ± 1	759
16	0.43	29 ± 1	718
17	1.86	29 ± 1	698
18	2.40	29 ± 1	1091
19	2.81	29 ± 1	621
20	3.43	29 ± 1	600
21	4.42	29 ± 1	365

หมายเหตุ: MEK ถูกเลือกใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้จึงเลือกให้ครอบคลุมทั้งในช่วงความเข้มข้นต่ำ ปานกลาง และสูง

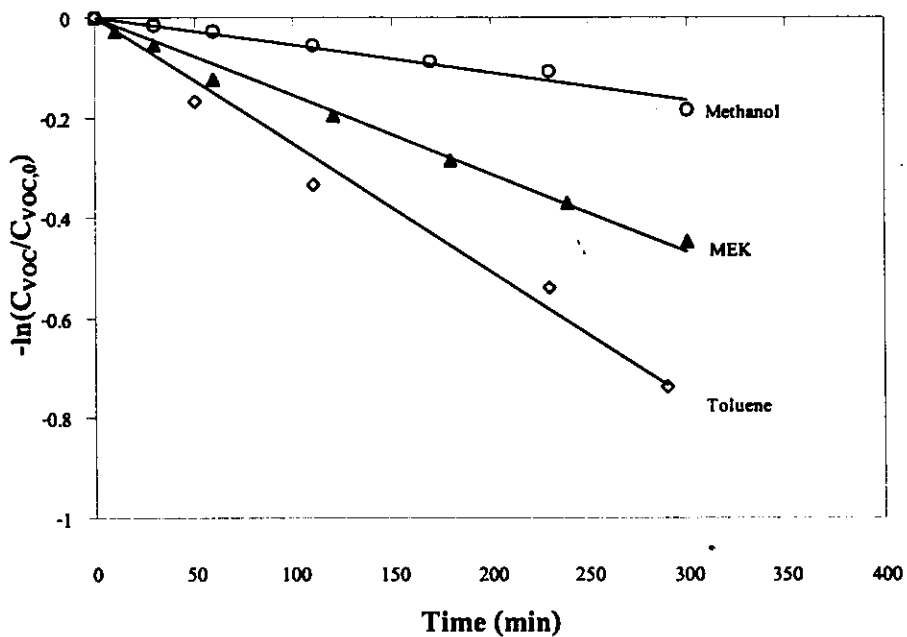


Figure 2. Typical plot of $-\ln(C_{VOC}/C_{VOC,0})$ versus t for volatilization of methanol, MEK, and toluene from wastewater ($T_{wastewater} = 29 \pm 1$ $^{\circ}C$, water depth = 20 cm and wastewater properties: BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L)

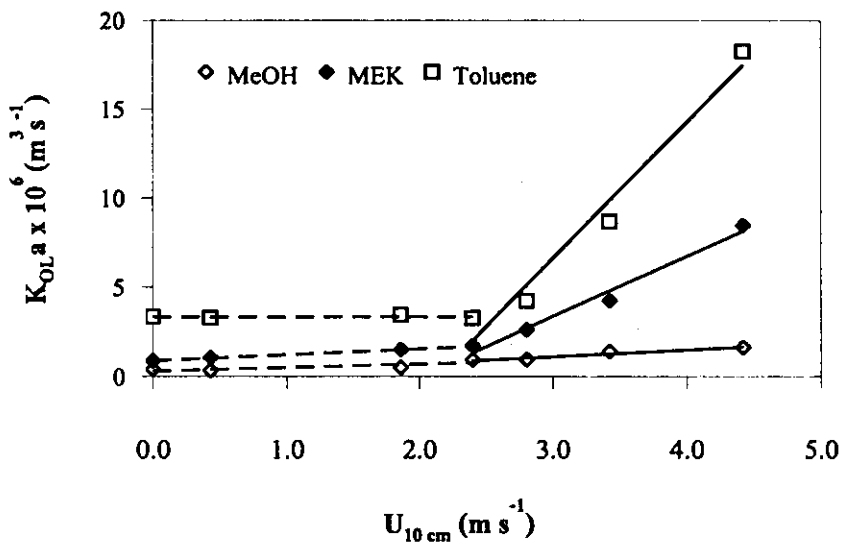


Figure 3. K_{OLa} of methanol MEK and toluene as a function of wind speed ($T_{wastewater} = 29 \pm 1$ °C, water depth = 20 cm and wastewater properties: BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L)

จาก Figure 3 จะเห็นได้ว่า K_{OLa} ของเมทานอลมีค่าต่ำสุด K_{OLa} ของทูลูอินมีค่าสูงสุดและ K_{OLa} ของ MEK มีค่าอยู่ระหว่างของเมทานอลและของทูลูอินในทุกความเร็วลมที่ศึกษา ผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะของ VOC คือทูลูอินเป็นสารอินทรีย์ระเหยที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูงสุดจึงสามารถระเหยจากน้ำได้เร็ว (H ของทูลูอินที่ 25°C เท่ากับ $6.68 \times 10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ (Mackay and Leinonen, 1975)) ในขณะที่เมทานอลเป็นสารอินทรีย์ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำสุดจึงระเหยจากน้ำได้ยากที่สุด (H ของเมทานอลที่ 25°C เท่ากับ $5.05 \times 10^{-6} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ (Zierold, 1996)) ส่วนค่าคงที่เฮนรีของ MEK อยู่ระหว่างของเมทานอลและทูลูอิน (H ของ MEK ที่ 25°C เท่ากับ $6.39 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ (Zierold, 1996)) ความสามารถในการระเหยจากน้ำจึงอยู่ระหว่างเมทานอลและทูลูอิน

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วมต่อค่า K_{OLa} ของ VOC แต่ละชนิดพบว่าในช่วงของความเร็วมต่ำๆ $U_{10cm} \leq 2.4 \text{ m s}^{-1}$ ค่า K_{OLa} ของเมทานอลค่อยๆเพิ่มขึ้นกับความเร็วที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่ K_{OLa} ของ MEK และของทูลูอินมีค่าเกือบคงที่ตลอดช่วงของความเร็วมนี้ และมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีการผสมพัดผ่าน ($U_{10cm} = 0 \text{ m s}^{-1}$) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความเร็วมน้อยกว่า 2.4 m s^{-1} นั้นไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดความปั่นป่วนในวิภาคของเหลวจึงไม่สามารถทำให้เกิดการระเหยของ VOC จากน้ำเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อ $U_{10cm} > 2.4 \text{ m s}^{-1}$ พบว่า K_{OLa} ของ VOC ทั้ง 3 ประเภทแปรผันกับความเร็วลมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะของทูลูอินซึ่งระเหยได้ง่ายนั้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วมในช่วงนี้มีผลต่อการระเหยของทูลูอินอย่างชัดเจนซึ่งเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟที่เปลี่ยนไปอย่างมาก

Figure 4 เปรียบเทียบระหว่าง K_{OLa} ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียกับกรณีที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์ที่ความเร็วมต่างๆ

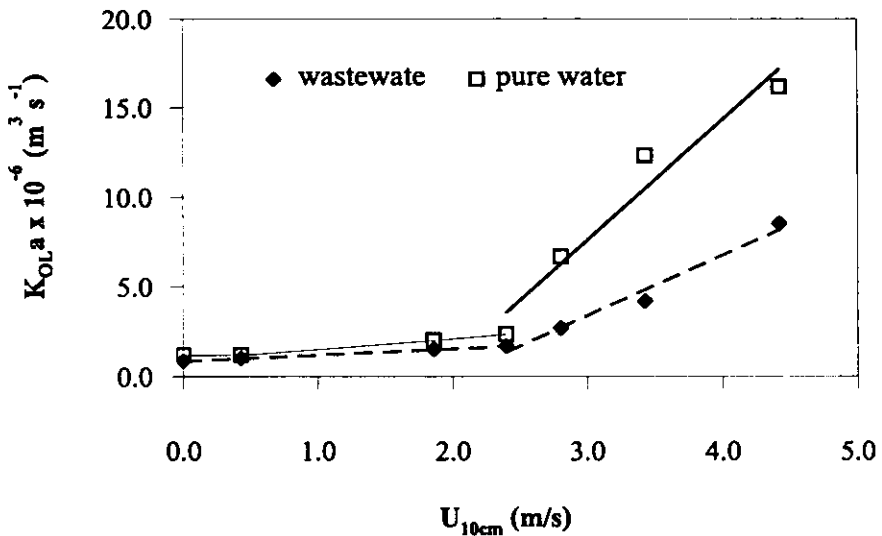


Figure 4. The comparison between $K_{OL}a$ of MEK volatilization from wastewater (BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L) and that from pure water at $T_{water} = 29 \pm 1$ °C and a water depth of 20 cm.

จากรูปดังกล่าวพบว่าในช่วงของความเร็วลมต่ำๆ ($U_{10cm} < 2.4 \text{ m s}^{-1}$) ความแตกต่างระหว่าง $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียกับที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 27% และความแตกต่างดังกล่าวแปรผันกับความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสารประกอบอินทรีย์ (organic mass) ที่อยู่ในน้ำเสียสามารถลดการระเหยของ MEK จากน้ำเสียได้ซึ่งเกิดจากกลไกการกักกันการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของ MEK ในน้ำเสียทำให้การระเหยของ MEK ลดลงเมื่อเทียบกับการระเหยจากน้ำบริสุทธิ์ซึ่งไม่มีกลไกดังกล่าว และจากการที่ความแตกต่างระหว่าง $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียกับที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์มีค่าเกือบคงที่ในช่วงความเร็วลมต่ำๆ แสดงให้เห็นว่าขนาดของความเร็วลมในช่วงดังกล่าวไม่สามารถทำให้เกิดความปั่นป่วนในภูมิภาคของเหลวในระบบที่ศึกษาได้ ความแตกต่างระหว่าง $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียกับที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์เป็นผลมาจากการกักกันการระเหยโดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วลมสูงกว่า 2.4 m s^{-1} พบว่า $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์มีค่าแตกต่างจาก $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญและความแตกต่างนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียทำหน้าที่กักกันการระเหยและลดความปั่นป่วนในน้ำเสีย เนื่องจากกระแสลมได้ตีส่งผลให้ $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียมีค่าต่ำกว่าที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ จากความแตกต่างระหว่าง $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์กับ $K_{OL}a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียแสดงว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ใช้ทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียที่พัฒนาขึ้นมาจากการศึกษาการระเหยของ VOC จากน้ำบริสุทธิ์และใช้กันอยู่ทั่วไปนั้น ไม่น่าจะทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำ

เสียได้ดี การใช้สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ได้จากการระเหยของ VOC จากน้ำเสีย โดยตรงจึงเป็นแนวทางที่ดีกว่า

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับการระเหยของ VOC จากน้ำเสีย, $k_{G,a,VOC}$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ที่ระเหยจากน้ำเสียคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอล ($k_{G,a,MeOH}$) ดังแสดงด้วยสมการ (6) โดยที่ $k_{G,a,MeOH}$ คำนวณได้จาก $K_{OL,a}$ ของเมทานอลตามสมการ (5) Figure 5 แสดงข้อมูลของ $k_{G,a,MeOH}$ ที่คำนวณได้กับความเร็วมวลเฉลี่ยเหนือผิวน้ำ (U_{10cm}) ในช่วงที่ศึกษา

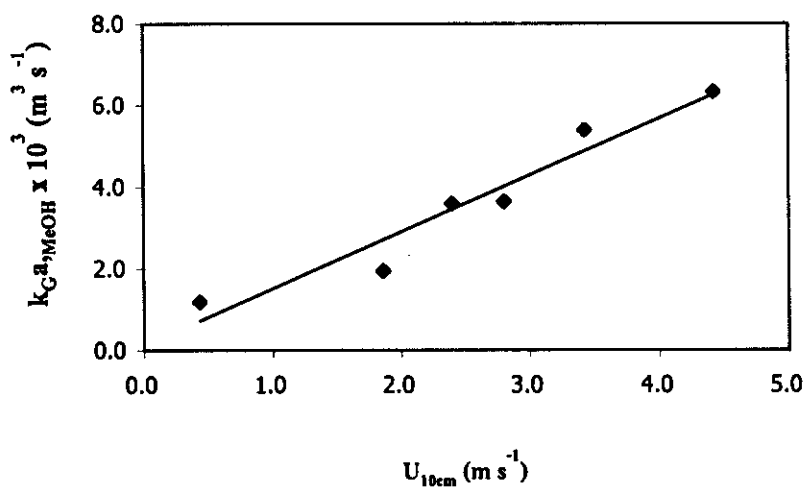


Figure 5. $K_{G,a,MeOH}$ of methanol in wastewater as a function of wind speed ($T_{wastewater} = 29 \pm 1$ °C, water depth = 20 cm and wastewater properties: BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L)

จาก Figure 5 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{G,a,MeOH}$ กับ U_{10cm} มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงที่สามารถแทนได้ด้วยสมการ (10) โดยมีค่า $R^2 = 0.94$

$$k_{G,a,MeOH} = 1.39 \times 10^{-3} U_{10cm} + 1.22 \times 10^{-4}, 0 \leq U_{10cm} \leq 4.42 \text{ ms}^{-1} \quad (10)$$

ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง $k_{G,a,MeOH}$ กับ U_{10cm} ที่ได้จากการระเหยของเมทานอลจากน้ำเสียในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับกรณีของการระเหยของเมทานอลจากน้ำบริสุทธิ์ที่เคยศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ (Bunyakan et al., 2001; Liss, 1974) แต่การระเหยของเมทานอลจากน้ำเสียจะให้ค่า $k_{G,a,MeOH}$ ที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจนดังแสดงเปรียบเทียบใน Figure 6 ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลจากกลไกการกีดกันการระเหยและกลไกการลดความปั่นป่วนในน้ำเสีย เนื่องจากสารอินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียมีผลต่อการระเหยของ VOCs ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว งานวิจัยจึงเสนอสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สสำหรับใช้ทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียใหม่โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลที่ระเหยจากน้ำเสียจริงและปรับแก้สำหรับ VOC ใดๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สกับสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการ (6) จะได้สมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ใดๆ ดังแสดงด้วยสมการ (11)

$$k_{G,a,VOC} = [1.39 \times 10^{-3} U_{10cm} + 1.22 \times 10^{-4}] \left[\frac{D_{VOC-air}}{D_{MeOH-air}} \right] \quad (11)$$

สมการ (11) สามารถใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOC ใดๆ ที่ระเหยจากน้ำเสียได้ การตรวจความถูกต้องของสมการนี้โดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC ใดๆ ที่สนใจตามสมการ (2) จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

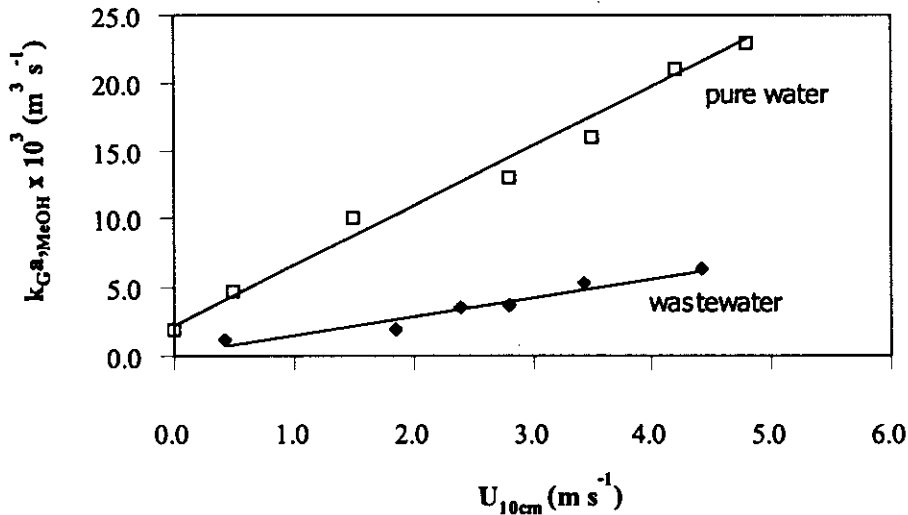


Figure 6. The comparison between $K_G a_{MeOH}$ of methanol volatilization from wastewater (BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L) and that from pure water at $T_{water} = 29 \pm 1$ °C and a water depth of 20 cm.

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสำหรับการระเหยของ VOC จากน้ำเสีย, $k_{L,a,VOC}$

สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ที่ระเหยจากน้ำเสียนำมาคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ ทูโลอิน ($k_{L,a,Toluene}$) ดังแสดงด้วยสมการ (8) โดยที่ $k_{L,a,Toluene}$ มีค่าเท่ากับ K_{OLa} ของทูโลอินตามสมการ (7) Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a,Toluene}$ กับความเร็วลมเฉลี่ยเหนือผิวน้ำ (U_{10cm}) ในช่วงที่ศึกษา จาก Figure 7 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a,Toluene}$ กับ U_{10cm} สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงความเร็วลมต่ำ ($U_{10cm} \leq 2.4 \text{ m s}^{-1}$) $k_{L,a,Toluene}$ ไม่แปรเปลี่ยนกับความเร็วลมโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ในขณะที่ที่ $U_{10cm} > 2.4 \text{ m s}^{-1}$ ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a,Toluene}$ กับ U_{10cm} มีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,a,Toluene}$ กับ U_{10cm} ตลอดช่วงของความเร็วลมที่ศึกษาคือ

$$k_{L,a,Toluene} = 3.35 \times 10^{-6}, U_{10cm} \leq 2.4 \text{ m s}^{-1} \quad (12)$$

และ $k_{L,a,Toluene} = 7.67 \times 10^{-6} U_{10cm} - 1.64 \times 10^{-5}, 2.4 < U_{10cm} \leq 4.42 \text{ m s}^{-1} \quad (13)$

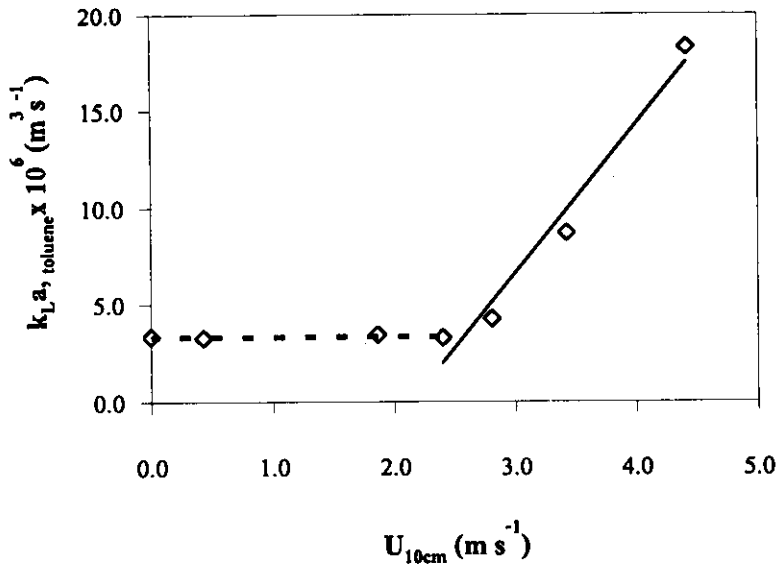


Figure 7. $K_L a_{toluene}$ of toluene in wastewater as a function of wind speed ($T_{wastewater} = 29 \pm 1$ °C, water depth = 20 cm and wastewater properties: BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L)

ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_L a_{Toluene}$ กับ U_{10cm} ที่ได้จากการระเหยของทูลอีนจากน้ำเสียในงานวิจัยนี้มีการเปลี่ยนความชันที่ความเร็วลมเท่ากับ $2.44 m s^{-1}$ ให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีของการระเหยของทูลอีนจากน้ำบริสุทธิ์ที่เคยศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ (Bunyakan et al., 2001) ที่พบจุดเปลี่ยนของความชันที่ความเร็วลมเท่ากับ $2.58 m s^{-1}$ แต่การระเหยของทูลอีนจากน้ำเสียจะให้ค่า $k_L a_{Toluene}$ ที่ต่ำกว่ากรณีของการระเหยจากน้ำบริสุทธิ์อย่างชัดเจนดังแสดงเปรียบเทียบใน Figure 8 ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลจากกลไกการกีดกันการระเหยและกลไกการลดความปั่นป่วนในน้ำเสียเนื่องจากสารอินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สมมุติฐานที่เชื่อว่าความเจือจางของ VOC ในน้ำเสียจะทำให้ VOC มีพฤติกรรมการถ่ายโอนมวลเหมือนกับในน้ำบริสุทธิ์และสามารถใช้สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่ได้จากการระเหยของ VOC จากน้ำบริสุทธิ์ในทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียจึงไม่ถูกต้องอีกต่อไป งานวิจัยจึงเสนอสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวสำหรับใช้ทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียใหม่โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทูลอีนที่ระเหยจากน้ำเสียจริงและปรับแก้สำหรับ VOC ใดๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวกับสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการ (8) จะได้สมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ใดๆ ดังแสดงด้วยสมการ (14) และ

$$(15) k_L a_{VOC} = 3.35 \times 10^{-6} \left[\frac{D_{VOC-liquid}}{D_{Toluene-liquid}} \right], U_{10cm} \leq 4.42 \text{ m s}^{-1} \quad (14)$$

และ $k_L a_{VOC} = [7.67 \times 10^{-6} U_{10cm} - 1.64 \times 10^{-5}] \left[\frac{D_{VOC-liquid}}{D_{Toluene-liquid}} \right], 2.4 < U_{10cm} \leq 4.42 \text{ m s}^{-1} \quad (15)$

สมการ (14) และสมการ (15) สามารถใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOC ใดๆ ที่ระเหยจากน้ำเสียได้ การตรวจความถูกต้องของสมการนี้โดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC ใดๆ ที่สนใจตามสมการ (2) จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

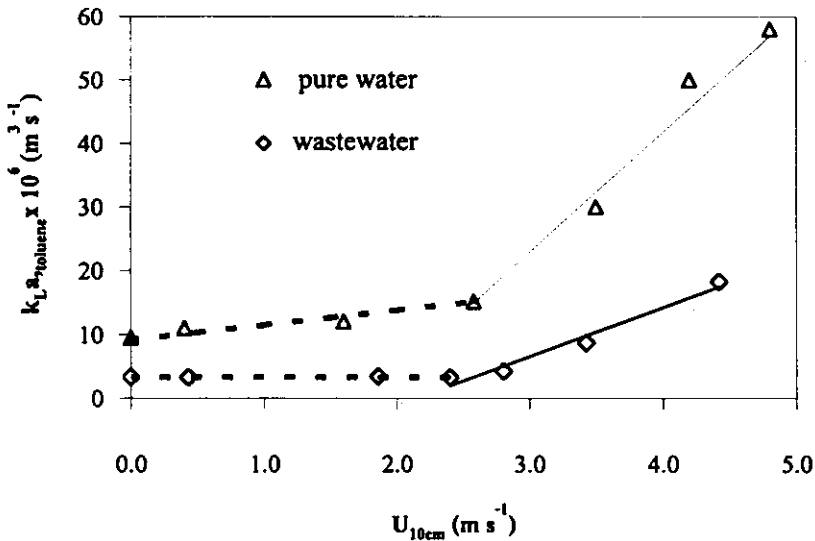


Figure 8. The comparison between $K_L a_{toluene}$ of toluene volatilization from wastewater (BOD 50-98 mg/L, COD = 2320-2960 mg/L and SS = 27-38 mg/L) and that from pure water at $T_{water} = 29 \pm 1$ °C and a water depth of 20 cm.

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOC: เปรียบเทียบระหว่างการทำนายโดยแบบจำลองกับผลการทดลอง

ในส่วนสุดท้ายของการวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (สมการ (11)) และสมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (สมการ (14) และ (15)) ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ MEK (ตามสมการ (2)) และเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยตรง ผลการคำนวณ $K_{OL} a$ ของ MEK โดยใช้ชุดสมการข้างต้นแสดงเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการระเหยของ MEK จากน้ำเสียและน้ำบริสุทธิ์ดังแสดงใน Figure 9 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าชุดสมการสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่พัฒนาขึ้นจากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียทำนาย $K_{OL} a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียได้ดีตลอดช่วงความเร็วลมที่ศึกษา แต่ทำนาย $K_{OL} a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง ซึ่งจะเห็นอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น ทั้งนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างคุณลักษณะของน้ำเสียกับน้ำบริสุทธิ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สมการ $k_G a_{VOC}$ และสมการ $k_L a_{VOC}$ ที่พัฒนาขึ้นจากการ

ระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจริงในการศึกษานี้ จึงเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียมากกว่าการใช้สมการที่พัฒนาขึ้นมาจากการระเหยของ VOCs จากน้ำบริสุทธิ์ที่มีรายงานไว้ทั่วไป

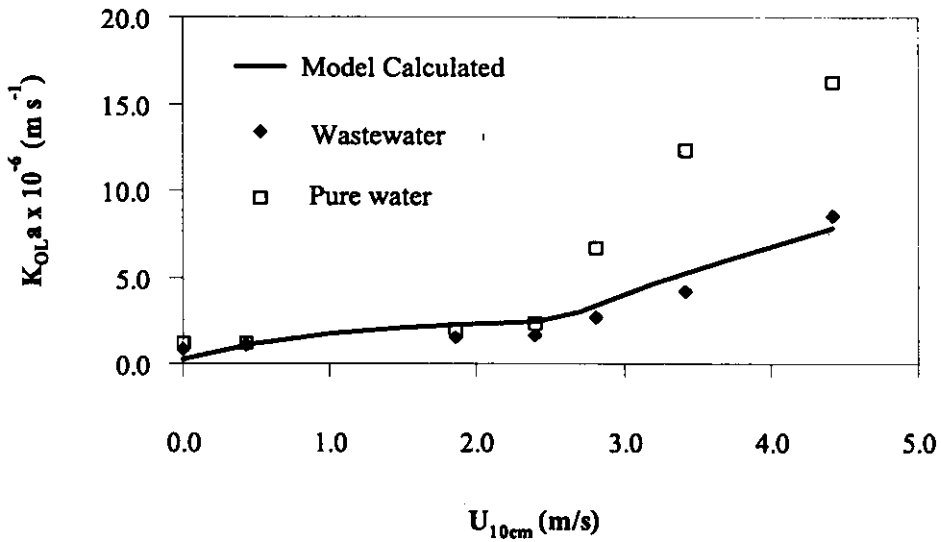


Figure 9 The comparison between predicted $K_{OL} a_{1,MEK}$ of MEK volatilization from wastewater and from pure water.

สรุปผลการทดลอง

การศึกษการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยจากน้ำเสียที่ความเร็วลมเหนือผิวน้ำต่างๆในถังระเหยขนาด 100 L พบว่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลเพิ่มขึ้นกับ U_{10cm} ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตลอดช่วงของ U_{10cm} ที่ศึกษา ในขณะที่สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทูลอินแบ่งออกเป็นสองช่วง โดยมีจุดเปลี่ยนที่ U_{10cm} เท่ากับ 2.4 m s^{-1} สมการของ $k_{G^a, VOC}$ และสมการของ $k_{L^a, VOC}$ ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการระเหยของเมทานอลและของทูลอินจากน้ำเสียตามลำดับ และได้ตรวจสอบความถูกต้องของสมการดังกล่าวโดยใช้ทำนาย $K_{OL} a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสีย ผลการตรวจสอบพบว่าสมการ $k_{G^a, VOC}$ และ $k_{L^a, VOC}$ ที่พัฒนาขึ้นจากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียทำนาย $K_{OL} a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำเสียได้ดีแต่ทำนาย $K_{OL} a$ ของ MEK ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง การศึกษานี้ยังพบว่า $K_{OL} a$ ของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำบริสุทธิ์มีค่าสูงกว่า $K_{OL} a$ ของ VOCs ที่ระเหยจากน้ำเสียมาก สมการ $k_{G^a, VOC}$ และสมการ $k_{L^a, VOC}$ ที่พัฒนาขึ้นจากการระเหยของ VOCs จากน้ำเสียจริงในการศึกษานี้ จึงเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายการระเหยของ VOC จากน้ำเสียมากกว่าการใช้สมการที่พัฒนาขึ้นมาจากการระเหยของ VOCs จากน้ำบริสุทธิ์ที่มีรายงานไว้ทั่วไป

เอกสารอ้างอิง

- Aneja, V.P., Bunton, B. Walker, J.T., Malik, B.P. 2001. Measurement and Analysis of Atmospheric Ammonia Emissions from Anaerobic Lagoons. *Atmospheric Environment*. 35: 1949-1958.
- Bunyakan, C., Tongsoi, P. and Tongurai, C. 2001. Film Mass Transfer Coefficient for the Prediction of Volatile Organic Compound Evaporation Rate from Open Water Basin. *Songklanakrin J. Sci. Technol.* 23(4): 563-577.
- Bunyakan, C. 1998. Mass Transfer Coefficient for Surface Impoundments and the Reduction of Volatile Organic Compound Emissions. Ph.D. Dissertation. Vanderbilt University. Nashville TN. USA.
- Corsi, R.L. 1991. Estimation of VOC Emissions Using the BASTE Model. *Environmental Progress*. 10(4):290-299.
- Escalas, A., Guadayol, J.M., Cortina, M., Rivera, J., and Caixach, J. 2003. Time and Space Patterns of Volatile Organic Compounds in a Sewage Treatment Plant. *Water Research*. 37: 3913-3920
- Hwang, S.T. 1981. Treatability and Pathways of Priority Pollutants in the Biological Wastewater Treatment. *AIChE Symposium Series*. 209 (77):316-326.
- Lin, T.Y., Sree, U., Tseng, S.H., Chiu, K.H., Wu, C.H., Lo, J.G. 2004. Volatile Organic Compound Concentrations in Ambient Air of Kaohsiung Petroleum Refinery in Taiwan. *Atmospheric Environment*. 38: 4111-4122
- Liss, P. S. 1973. Processes of Gas Exchange Across an Air-water Interface. *Deep-Sea Research*. 20: 221-238
- Lunney, P.D., Springer, C., Thibodeaux, L.J. 1985. Liquid-Phase Mass Transfer Coefficients for Surface Impoundments. *Environmental Progress*. 4(3), 203-211.
- Mackay, D., and Yeun, A.T.K. 1983. Mass Transfer Coefficient Correlations for Volatilization of Organic Solutes from Water. *Environ. Sci. Technol.* 17: 211-217
- Mackay, D., and Leinonen, P.J. 1975. Rate of Evaporation of Low-Solubility Contaminants from Water Bodies to Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 9(13): 1178-1180.
- Sadek, S.E., Smith, J.D., Watkin, A.T., Gebel, R. 1996. Mass Transfer of Volatile Organics from Large Open Basins. *Environmental Progress*. 15(2): 82-92.
- Zierold, M.K. 1996. Henry's Law Constants of Selected VOCs: Experimentally Determined and Estimated Values. Master Thesis. Vanderbilt University. Nashville TN. USA.