

ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำ

จรัญ บุญกาญจน์¹ เสาวภาคย์ มาลากาญจน์² และ ชاکริต ทองอุไร³

Abstract

Bunyakan, C., Malakarn, S., and Tongurai, C.

The influence of surfactant on mass transfer coefficients in evaporation of volatile organic compound from water basin

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2002, 24(2) : 255-271

Volatile organic compounds (VOCs) have been found in wastewater of many chemical industries. Evaporation of VOCs from open water basin in waste treatment facilities causes air-pollution and has been regulated in many countries. Reduction or prevention of VOCs evaporation from open water basin is then necessary. The aim of this research was to investigate the influence of surface film generated by an insoluble surfactant on the mass transfer coefficient of VOCs evaporating from water. Hexadecanol and octadecanol were used as surfactant in this investigation with the amount in the range of 0 to 35 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ and 0 to 25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively. The VOCs used in this study were methanol, acetone, methyl ethyl ketone and toluene. The experimental results showed that the surfactant film can reduce the gas film and liquid coefficients by 56 and 80 %, respectively. The suitable amounts of the surfactant were 25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ for hexadecanol and 15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ for octadecanol. From this investigation we can conclude that covering the water surface with a film of hexadecanol or octadecanol could significantly reduce the VOCs evaporation rate.

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand.

¹Ph.D. (Chemical Engineering) ²นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี ³D.Eng. (Chemical Engineering) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail: bcharun@ratree.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 29 พฤศจิกายน 2544 รับลงพิมพ์ 22 กุมภาพันธ์ 2545

Finally, the empirical equations correlating gas film and liquid film coefficient to amount of surfactants were developed and verified against the experimental data. The predicted values of the overall mass transfer coefficients, obtained by using these empirical equations, were in good agreement with the measured values. Thus the empirical equations of mass transfer coefficients developed in this work can be used to predict the evaporation rates of VOCs from water surface covered by hexadecanol or octadecanol film.

Key words : surfactant, evaporation, mass transfer coefficient, VOCs, emission

บทคัดย่อ

จรัญ บุญกาญจน์ เสาวภาคย์ มาลากาญจน์ และ ชาคริต ทองอุไร
ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในการระเหยของ
สารประกอบอินทรีย์จากแหล่งน้ำ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2545 24(2) : 255-271

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีจะมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) ประปนอยู่ การระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดในระบบบำบัดน้ำเสียก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ โดยในหลายประเทศได้มีการควบคุมการปล่อย VOCs สู่อากาศให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นควรมีวิธีการป้องกันการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของฟิล์มที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ละลายน้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs ที่ระเหยจากแหล่งน้ำ ในการศึกษาจะใช้สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด ได้แก่ hexadecanol และ octadecanol โดยปริมาณของ hexadecanol และ octadecanol ที่ใช้ศึกษาจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 35 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และ 0 ถึง 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วน VOCs ที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย เมทานอล อะซีโตน เมทิล เอทิล คีโตน และโทโลอีน ผลจากการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวสามารถลดสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs ได้สูงสุดถึง 56 และ 80 % ตามลำดับ ปริมาณที่เหมาะสมของ hexadecanol คือ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และของ octadecanol คือ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. จากการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่าการคลุมผิวน้ำด้วยฟิล์มของ hexadecanol หรือ octadecanol จะสามารถลดการระเหยของ VOCs ได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนสุดท้ายของบทความนี้ กล่าวถึงการพัฒนาสมการเอมพิริคัลจากข้อมูลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวกับปริมาณของ hexadecanol และ octadecanol จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องของสมการเอมพิริคัลดังกล่าว โดยใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ต่าง ๆ เทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง แสดงว่าสมการเอมพิริคัลที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายอัตราการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำที่ปกคลุมด้วยฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษาได้

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) ประปนอยู่ การระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดในระบบบำบัดน้ำเสียก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ โดยในหลายประเทศได้มีการควบคุมการปล่อย VOCs สู่อากาศให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นควรมีวิธีการป้องกันการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด โดยทั่วไป

อัตราการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำเปิดสู่อากาศถูกควบคุมโดยความต้านทานในวัฏภาคแก๊สและในวัฏภาคของเหลวอันเนื่องมาจากชั้นฟิล์มแก๊สและชั้นฟิล์มของเหลวตามลำดับ อย่างไรก็ตามสำหรับแหล่งน้ำเปิดโดยทั่วไปมักพบว่ามีสารผสมของโมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นชั้นฟิล์มปกคลุมผิวน้ำของแหล่งน้ำ ส่งผลให้ความต้านทานต่อการระเหยของ VOCs มีค่าเพิ่ม

ขึ้น การศึกษาผลของฟิล์มที่เกิดจากการสะสมของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (surfactant) บนผิวน้ำต่อการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดจึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยมีเหตุผลหลัก 2 ประการคือ ประการแรกเพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของฟิล์มประเภทนี้ต่อการระเหยของ VOCs และประการที่สองซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้คือสามารถใช้ผลจากการศึกษานี้เพื่อการลดหรือควบคุมการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำไปใช้เพื่อป้องกันหรือควบคุมมลภาวะทางอากาศอันเนื่องจากการระเหยของ VOCs สู่อากาศได้ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาถึงผลของฟิล์มของสารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด ได้แก่ hexadecanol และ octadecanol ทั้งนี้เพราะมีรายงานว่าฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวจำพวกแอลกอฮอล์โมเลกุลยาวเหล่านี้ สามารถใช้เพื่อลดการระเหยของน้ำหรือลดการถ่ายโอนของแก๊สผ่านผิวน้ำได้ดี (Desai *et al.*, 1990; O'Brien *et al.*, 1976; Bean *et al.*, 1968) จึงน่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำได้ และจากการศึกษาเบื้องต้นโดยจรัญและคณะ (2544ก) พบว่าการเติม hexadecanol ลงบนผิวน้ำในปริมาณ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. จะสามารถลดการระเหยของเมทานอลและของโทลูอินจากแหล่งน้ำได้ถึง 56 และ 75% ตามลำดับ จึงเป็นสิ่งยืนยันในเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ฟิล์มของสารประเภทนี้ในการลดการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด งานวิจัยนี้เป็น

การศึกษาที่ต่อเนื่องจากการศึกษาดังกล่าวโดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ 1) ศึกษาผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ VOCs 2) ระบุปริมาณ hexadecanol และ octadecanol ที่เหมาะสมสำหรับการใช้เพื่อลดการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิด และ 3) พัฒนาสมการเอมพิริคัลของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว เพื่อใช้ทำนายอัตราการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำที่ปกคลุมด้วยฟิล์มของ hexadecanol และ octadecanol โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม

อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิว (hexadecanol และ octadecanol) ต่อการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำทำในถังระเหยที่มีพื้นที่ของการระเหยเท่ากับ 1.56 ตร.เมตร (0.4 × 3.9 ตร.เมตร) โดยรายละเอียดของชุดทดลองสำหรับการศึกษาการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำเปิดมีรายงานไว้ทั่วไป (จรัญ และคณะ 2544ข) และแสดงเฉพาะส่วนของถังระเหยตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง และระบบการหมุนเวียนของสารละลายในถัง ใน Figure 1

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการระเหยของ VOCs แต่ละชนิดโดยอิสระต่อกัน โดย VOCs ที่ศึกษาประกอบด้วย เมทานอล อะซีโตน เมทิล

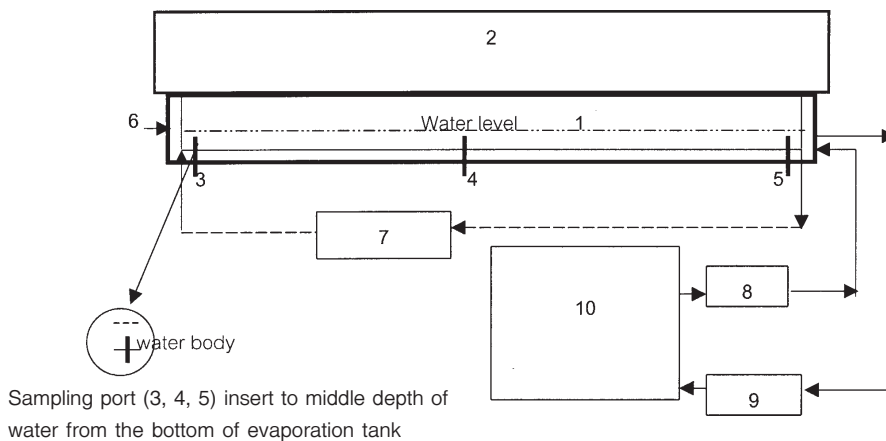


Figure 1. Schematic of evaporation tank for unsteady state evaporation experiments (1 water tank, 2 wind tunnel, 3, 4, 5 sampling port, 6 water tank jacket, 7, 8, 9 pump, 10 hot water tank and temperature controller)

เอทิล คีโตน (MEK) และ ทูโลอิน การระเหยของเมทานอลและทูโลอินจากแหล่งน้ำที่ไม่มีฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวปกคลุมจะควบคุมโดยฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวตามลำดับ ดังนั้นเมทานอลและทูโลอินจึงถูกเลือกเพื่อศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้จะทำให้สามารถกำหนดหรือระบุปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม สำหรับการลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวได้ ส่วนกระบวนการการระเหยของ VOCs ตัวอื่นๆ ที่ศึกษาคือ อะซีโตน และ เมทิล เอทิล คีโตน (MEK) จะขึ้นอยู่กับทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวในร้อยละที่ต่างกัน ดังนั้น VOCs ในกลุ่มนี้จะถูกเลือกเพื่อใช้ตรวจสอบความเหมาะสมของปริมาณของ hexadecanol และ octadecanol ที่ได้จากการศึกษาในช่วงแรก

และใช้ทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีสองฟิล์มภายใต้สภาวะที่มีฟิล์มปกคลุมผิวน้ำ สภาวะการทดลองเช่นความเข้มข้นเริ่มต้นของ VOCs และปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในแต่ละการทดลองแสดงใน Table 1 เนื่องจากปริมาณของสารละลาย VOCs ที่ใช้ในแต่ละการทดลองเท่ากับ 120 ลิตร การเตรียมสารละลายดังกล่าวในปริมาณที่มากมีผลทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ VOCs ในแต่ละการทดลองของ VOCs ชนิดเดียวกันแตกต่างกันออกไปบ้างดังแสดงใน Table 1 แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต่างกันไม่มีผลต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแต่อย่างใด

การทดลองเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายของ VOCs ที่ต้องการศึกษาในน้ำปริมาตร 120 ลิตร ให้มีความเข้มข้นตามต้องการ (ดู Table 1) ใส่สารละลายดังกล่าวลงในถังระเหย จากนั้นจึงเตรียมสารละลายของสาร

Table 1. Experimental conditions

1.1 For studying the influence of hexadecanol on evaporation rate of methanol from water

Run No.	Amount of hexadecanol added ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	t_{water} ($^{\circ}\text{C}$)	Initial concentration of methanol in water (mg/L)
1	0.0	27 \pm 2	843
2	5.0	27 \pm 2	1259
3	10.0	27 \pm 2	1327
4	15.0	27 \pm 2	1150
5	20.0	27 \pm 2	840
6	25.0	27 \pm 2	1112
7	30.0	27 \pm 2	1163
8	35.0	27 \pm 2	1394

1.2 For studying the influence of hexadecanol on evaporation rate of toluene from water

Run No.	Amount of hexadecanol added ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	t_{water} ($^{\circ}\text{C}$)	Initial concentration of toluene in water (mg/L)
9	0.0	27 \pm 2	180
10	5.0	27 \pm 2	80
11	10.0	27 \pm 2	170
12	15.0	27 \pm 2	162
13	20.0	27 \pm 2	193
14	25.0	27 \pm 2	182

(1.3 continued.)

Table 1. (continued)

1.3 For studying the influence of octadecanol on evaporation rate of methanol from water

Run No.	Amount of octadecanol added ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	t_{water} ($^{\circ}\text{C}$)	Initial concentration of methanol in water (mg/L)
15	5	27 \pm 2	1047
16	10	27 \pm 2	943
17	15	27 \pm 2	1038
18	20	27 \pm 2	1007
19	25	27 \pm 2	969

1.4 For studying the influence of octadecanol on evaporation rate of toluene from water

Run No.	Amount of octadecanol added ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	t_{water} ($^{\circ}\text{C}$)	Initial concentration of toluene in water (mg/L)
15	5	27 \pm 2	1047
20	5	27 \pm 2	191
21	10	27 \pm 2	183
22	15	27 \pm 2	254
23	20	27 \pm 2	113
24	2.5	27 \pm 2	183

1.5 For studying the influence of selected surfactant on evaporation rate of acetone from water

Run No.	Type/Amount of surfactant added ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	t_{water} ($^{\circ}\text{C}$)	Initial concentration of acetone in water (mg/L)
25	None	27 \pm 2	991
26	Hexdecanol/25	27 \pm 2	990
27	Octadecanol/15	27 \pm 2	998

1.6 For studying the influence of selected surfactant on evaporation rate of MEK from water

Run No.	Type/Amount of surfactant added ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	t_{water} ($^{\circ}\text{C}$)	Initial concentration of MEK in water (mg/L)
28	None	27 \pm 2	834
29	Hexdecanol/25	27 \pm 2	864
30	Octadecanol/15	27 \pm 2	851

ลดแรงตึงผิวที่ใช้ (hexadecanol หรือ octadecanol แล้วแต่กรณี) และหยดสารละลายของสารลดแรงตึงผิวลงบนผิวน้ำให้มีปริมาณของสารลดแรงตึงผิวตามต้องการโดย

ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในแต่ละการทดลอง แสดงดัง Table 1 ในการหยดสารละลายของสารลดแรงตึงผิวบนผิวน้ำนั้นจะหยดที่ตำแหน่งต่างๆ 4-5 จุด กระจายไป

ทั่วผิวน้ำจากนั้นจึงปล่อยให้ไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าสารลดแรงตึงผิวที่หยดลงไปได้แพร่กระจายไปทั่วผิวน้ำ จึงเริ่มการทดลองโดยเก็บตัวอย่างสารละลายจากตำแหน่งต่าง ๆ 3 ตำแหน่งคือตำแหน่ง 3, 4 และ 5 ตามความยาวของถังดังแสดงใน Figure 1 เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ VOCs ในน้ำ หลังจากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างต่างๆ เหมือนตอนเริ่มต้นทุกๆ 0.5-1 ชั่วโมงตามที่ได้กำหนดไว้จนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งจะใช้เวลาอยู่ในช่วง 6-20 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับชนิดของ VOCs

ตัวอย่างน้ำที่เก็บที่เวลาต่างๆ ตลอดเวลาของการทดลองนั้นจะถูกเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 °C และจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของ VOCs ในน้ำ ภายในวันเดียวกัน ในแต่ละครั้งที่เก็บตัวอย่างจะทำการบันทึกอุณหภูมิของน้ำ อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศ โดยตลอดช่วงของการศึกษานี้ อุณหภูมิของน้ำและของอากาศมีค่าประมาณ 27±2 °C และ 29±2 °C ตามลำดับ ในขณะที่ความชื้นของอากาศตลอดช่วงของการทดลองมีค่าประมาณ 60-80% การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ VOCs ทำโดยใช้แก๊สโครมาโตกราฟี (Hewlett Packard, Model 5790A) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) คอลัมน์ที่ใช้ยาว 6 ฟุต บรรจุด้วย OV-101 อุณหภูมิของเครื่องตรวจหา (detector) และของที่ฉีดตัวอย่าง (Injection port) มีค่าเป็น 300 และ 250 °C ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิของห้องอบ (Oven) ของแก๊สโครมาโตกราฟี แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 60-100 °C ขึ้นอยู่กับชนิดของ VOCs ที่ต้องการวิเคราะห์ ข้อมูลของความเข้มข้นของ VOCs ที่เวลาต่างๆ จะนำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส, k_G

พลັกซ์การระเหยของ VOCs (N_{VOC}) จากแหล่งน้ำเปิดสามารถหาค่าได้โดยใช้แนวคิดของทฤษฎีสองฟิล์ม ซึ่งจะสมมุติว่า ความเข้มข้นที่อยู่ในชั้นระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว (interface) จะอยู่ในสมดุลกันและสามารถแสดงได้ในเทอมของค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's

constant, H) ทำให้สามารถกำจัดเทอมของความเข้มข้นที่ชั้นระหว่างหน้าออกไปได้ จึงสามารถแสดงพลັกซ์ของการระเหยในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวัฏภาคของเหลว (overall liquid phase mass transfer coefficient, K_{OL}) และความแตกต่างของความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลว (C_L) กับความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลวที่อยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นในวัฏภาคแก๊ส (C_L^*) ดังสมการ (1)

$$N_{VOC} = K_{OL} (C_L - C_L^*) \quad (1)$$

โดยที่

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

เมื่อ k_G คือ สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊ส (m/s) k_L คือ สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว (m/s) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ซึ่งมีค่าเป็น 8.21×10^{-5} atm m³/mol K T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์มีหน่วยเป็น K และ H คือค่าคงที่ของเฮนรี มีหน่วยเป็น atm m³/mol สำหรับ VOCs ที่ละลายน้ำได้ดี หรือ VOCs ที่มีความดันไอต่ำ เช่น เมทานอล จะมีค่า H ต่ำ ส่งผลให้เทอมแรกของการสมการ (2) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมที่สองดังนั้นสำหรับกรณีของเมทานอล สมการที่ (2) จะลดรูปเป็น

$$k_G = \frac{RTK_{OL}}{H} \quad (3)$$

โดยการรวมสมการ (1) กับค่าของ N_{VOC} ที่ได้จากการทำดุลมวลรอบแหล่งน้ำที่มีการระเหย จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับความเข้มข้นของ VOCs ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ได้ดังสมการ (Bunyakan et al., 2001)

$$\ln \frac{C_L}{C_{L0}} = -\frac{K_{OL}t}{h} \quad (4)$$

เมื่อ C_L คือ ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลา t (mol/m³) C_{L0} คือ ความเข้มข้นของ VOCs ในวัฏภาคของเหลวที่เวลาเริ่มต้น (mol/m³) h คือ ความลึกของแหล่งน้ำ (m) และ t คือ เวลา (s) ดังนั้นจากสมการ (4) และจากข้อมูลของความเข้มข้นจากการระเหยของเมทานอลจากแหล่งน้ำกับเวลาจะสามารถหาค่า K_{OL} ของเมทานอลที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้ โดยกราฟแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} ของเมทานอลกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทั้งในกรณีของ hexadecanol และของ octadecanol แสดงดัง Figure 2

จาก Figure 2 จะเห็นได้ว่า K_{OL} ของเมทานอลมีค่าลดลงตามปริมาณของ hexadecanol และของ octadecanol ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวทำให้เกิดความต้านทานต่อการระเหย K_{OL} จึงลดลงตามปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า K_{OL} ลดลงกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงปริมาณหนึ่ง K_{OL} มีค่าคงที่ แสดงว่าปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่มากเกินไปไม่ได้ทำให้เกิดฟิล์มที่มีความต้านทานต่อการระเหยสูงแต่อย่างใด แต่

จะมีปริมาณที่เหมาะสมค่าหนึ่งซึ่งจากการทดลองนี้ พบว่าฟิล์มที่เกิดจาก hexadecanol ในปริมาณที่อยู่ในช่วง 25-30 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และฟิล์มที่เกิดจาก octadecanol ในปริมาณที่อยู่ในช่วง 15-20 ไมโครกรัม/ตร.ซม. เป็นฟิล์มที่ทำให้เกิดความต้านต่อการระเหยของเมทานอลสูงที่สุด จากค่า K_{OL} ที่ได้จากการทดลองและค่าของ H ของเมทานอลที่รายงาน (Schaffer and Daubert, 1969) ทำให้สามารถหาค่า k_G จากการระเหยของเมทานอล ได้ตามสมการ (3) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง k_G ของเมทานอลกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงใน Figure 3

จาก Figure 3 จะเห็นได้ว่า k_G มีค่าลดลงตาม

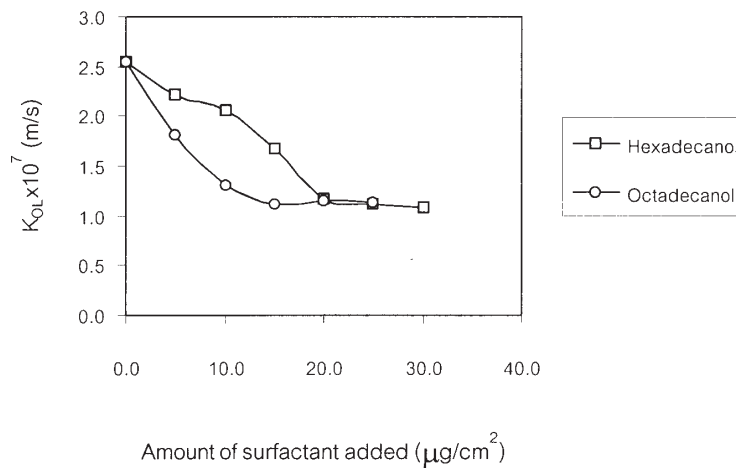


Figure 2. Dependence of surfactant on overall mass transfer coefficient of methanol

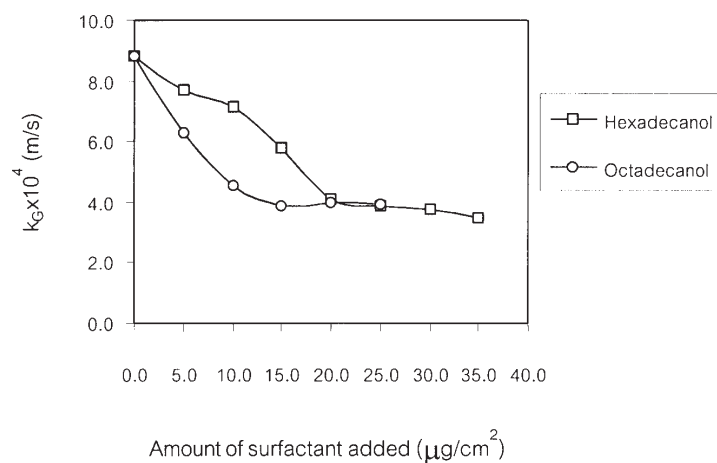


Figure 3. Dependence of surfactant on gas film coefficient of methanol

ปริมาณของ hexadecanol และ octadecanol ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเอ็กโปเนนเชียลและคงที่ที่ค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง โดยมีสิ่งที่น่าสนใจคือค่าต่ำสุดของ k_G ที่เป็นไปได้ไม่ว่าจะใช้ hexadecanol หรือ octadecanol จะมีค่าเท่ากัน แต่ปริมาณของ hexadecanol และ octadecanol ที่ทำให้ k_G มีค่าลดลงถึงค่าต่ำสุดนี้มีค่าไม่เท่ากัน คือ ต้องใช้ hexadecanol และ octadecanol ในปริมาณที่อยู่ในช่วง 25-30 และ 15-20 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ตามลำดับ ผลการศึกษาจึงแสดงเป็นนัยว่าชั้นฟิล์มที่เกิดจากปริมาณของ hexadecanol ในช่วง 25-30 ไมโครกรัม/ตร.ซม. มีคุณสมบัติในการป้องกันการระเหยของเมทานอลจากน้ำเทียบเท่ากับชั้นฟิล์มที่เกิดจากปริมาณของ octadecanol ในช่วง 15-20 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ทั้งนี้เพราะ octadecanol มีโมเลกุลที่ยาวกว่า hexadecanol จึงใช้ปริมาณน้อยกว่า

ผลการศึกษาที่น่าสนใจในอีกประเด็นหนึ่งคือ แม้ว่า จะเพิ่มปริมาณของ hexadecanol และ octadecanol ให้มากกว่า 25-30 และ 15-20 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ตามลำดับ แต่ก็ไม่สามารถลดค่า k_G ให้ต่ำลงไปได้อีกซึ่งแสดงว่าชั้นของฟิล์มที่เกิดจาก hexadecanol ในปริมาณ 25-30 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และชั้นของฟิล์มที่เกิดจาก octadecanol ในปริมาณ 15-20 ไมโครกรัม/ตร.ซม. มีคุณสมบัติในการป้องกันการระเหยของเมทานอลได้เหมือนกับชั้นของฟิล์มที่เกิดจากการใช้ hexadecanol หรือใช้ octadecanol ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณข้างต้น ทำให้เชื่อได้ว่า การใช้ hexadecanol ในปริมาณที่มากกว่า 25-30 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และการใช้ octadecanol ในปริมาณที่มากกว่า 15-20 ไมโครกรัม/ตร.ซม. จะเกิดเป็นฟิล์มของชั้นโมเลกุลที่ซ้อนทับกันหลายชั้น ทำให้ความยืดหยุ่นของชั้นฟิล์มหายไป การกลับคืน (recovery) ของชั้นฟิล์มเมื่อมีการฉีกขาดของฟิล์มในระหว่างกระบวนการระเหยทำได้ช้า และเนื่องจากความดันผิว (surface pressure) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ การใช้ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดความดันผิวสูง ซึ่งสามารถทำให้ฟิล์มเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดเป็นฟิล์มของโมเลกุลชั้นเดียว (monomolecular film) หรือเกิดเป็นฟิล์มของโมเลกุลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์มชั้นเดียวมากที่สุดจะสามารถลดการระเหยของเมทานอลได้ดีกว่า

ส่วนการที่ฟิล์มที่เกิดจาก hexadecanol ในปริมาณที่น้อยกว่า 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และฟิล์มที่เกิดจาก octadecanol ในปริมาณที่น้อยกว่า 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ไม่สามารถลดการระเหยได้ดีเท่าที่ควร อาจจะเป็นเพราะฟิล์มที่ได้ยังไม่ครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดหรือยังไม่เป็นฟิล์มชั้นเดียวนั่นเอง ดังนั้นจากการศึกษาผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณของ hexadecanol ที่เหมาะสมที่ควรใช้ในการลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการการระเหยควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส คือ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ในขณะที่ปริมาณของ octadecanol ที่เหมาะสม สำหรับกรณีนี้ คือ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. โดยสามารถลดค่า k_G ได้ถึง 56% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว

ผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลว, k_L

การระเหยของ VOCs ที่ละลายน้ำได้น้อยหรือ VOCs ที่มีความดันไอสูง เช่น ทูโลอิน ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง ($H > 5 \times 10^3$ atm m³/mol) ทำให้เทอมที่สองทางขวามือของสมการ (2) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมแรก ดังนั้นสำหรับการระเหยของทูโลอินจากน้ำ จะได้ว่า

$$k_L = K_{OL} \quad (4)$$

ดังนั้นจากข้อมูลของความเข้มข้นของทูโลอินในน้ำที่เวลาต่างๆ เมื่อนำมาสังเคราะห์ตามสมการ (4) และ สมการ (3) จะสามารถหาค่า สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทูโลอินได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง k_L ของทูโลอินกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวทั้งกรณีของ hexadecanol และ octadecanol แสดงดัง Figure 4

จาก Figure 4 จะเห็นได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวลงบนผิวน้ำจะทำให้ k_L ของทูโลอินลดลงในลักษณะแบบเอ็กโปเนนเชียลเช่นเดียวกันและสุดท้ายจะคงที่ที่ค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง โดยค่า k_L ต่ำสุดที่เป็นไปได้ เกิดจากการใช้ hexadecanol และ octadecanol ในปริมาณ 15 และ 5 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ตามลำดับ การใช้ hexadecanol และ octadecanol ในปริมาณที่สูงกว่าปริมาณดังกล่าวไม่สามารถลดค่า k_L ได้เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ดังนั้นจากการ

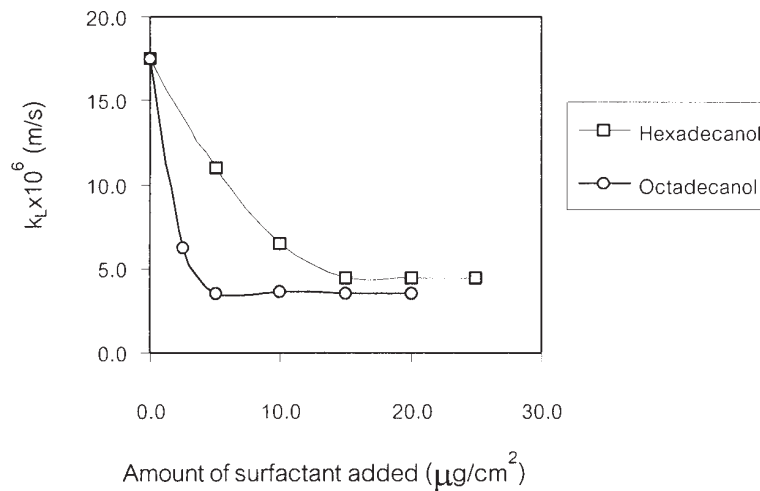


Figure 4. Dependence of surfactant on liquid film coefficient of toluene

ศึกษาผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณของ hexadecanol ที่เหมาะสมที่ควรใช้ในการลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการระเหยควบคุมโดยฟิล์มของเหลวคือ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ในขณะที่ปริมาณที่เหมาะสมของ octadecanol สำหรับกรณีนี้คือ 5 ไมโครกรัม/ตร.ซม. โดยสามารถลดค่า k_L ได้ถึงประมาณ 75% และ 80% สำหรับกรณีของ hexadecanol และกรณีของ octadecanol ตามลำดับ

และเมื่อเปรียบเทียบ Figure 4 กับ Figure 3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าชั้นฟิล์มที่เกิดจากปริมาณของ hexadecanol หรือ octadecanol ที่เท่ากันจะมีผลต่อ k_L มากกว่า k_G ทั้งนี้เพราะการปกคลุมผิวหน้าด้วยฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวนอกจากจะกีดกันการแพร่ของโมเลกุลแล้ว ยังสามารถลดความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้ k_L ลดลงได้ด้วย แต่การลดความปั่นป่วนในลักษณะดังกล่าวมีผลต่อ k_G น้อยมากเนื่องจาก k_G จะควบคุมโดยความปั่นป่วนในวัฏภาคแก๊ส ดังนั้นการลดลงของ k_G จึงเป็นผลจากการกีดกันการแพร่ของโมเลกุลโดยฟิล์มเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การลดลงของ k_L เป็นผลมาจากทั้งการกีดกันการแพร่และการลดความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้า จึงทำให้สามารถลด k_L ได้มากกว่า k_G

ผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมบนฐานของวัฏภาคของเหลว, K_{OL}

ในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าปริมาณของ hexadecanol เท่ากับ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และปริมาณของ octadecanol เท่ากับ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการระเหยถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส คือ มีความต้านต่อการระเหยส่วนใหญ่ (>90%) อยู่ในวัฏภาคแก๊ส และพบว่า ปริมาณของ hexadecanol เท่ากับ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และปริมาณของ octadecanol เท่ากับ 5 ไมโครกรัม/ตร.ซม. เพียงพอสำหรับการลดการระเหยของ VOCs ที่กระบวนการระเหยถูกควบคุมโดยฟิล์มของเหลว ซึ่งความต้านทานต่อการระเหยส่วนใหญ่ (>90%) จะอยู่ในวัฏภาคของเหลว อย่างไรก็ตามเนื่องจากในแหล่งน้ำเสียโดยส่วนใหญ่จะมี VOCs ทั้ง 2 ประเภทอยู่ด้วยกันเสมอ ดังนั้นปริมาณของ hexadecanol หรือของ octadecanol เท่ากับ 25 หรือ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ตามลำดับ น่าจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง เพราะจะเป็นปริมาณที่สามารถลดการระเหยของ VOCs ทั้ง 2 ประเภทได้ และปริมาณของ hexadecanol และของ octadecanol ข้างต้น ควรจะสามารถลดการระเหยของ VOCs อื่นๆ ที่มีความต้านทานอยู่ในทั้งสองวัฏภาคอย่างมีนัยสำคัญได้ด้วย นั่นคือปริมาณของ hexadecanol เท่ากับ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. หรือปริมาณของ octadecanol

เท่ากับ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. ควรจะเพียงพอสำหรับใช้ลดการระเหยของ VOCs ทุกชนิดได้

จากการตรวจสอบโดยทดลองใช้ hexadecanol ในปริมาณ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และใช้ octadecanol ในปริมาณ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. เพื่อลดการระเหยของ VOCs ประเภทต่างๆ ประกอบด้วย VOCs ที่กระบวนการการระเหยถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส (เช่น เมทานอล และ อะซีโตน) VOCs ที่กระบวนการการระเหยถูกควบคุมโดยฟิล์มของเหลว (เช่น ทุโลอิน) และ VOCs ที่กระบวนการการระเหยไม่ได้ถูกควบคุมโดยฟิล์มของเหลวหรือฟิล์มแก๊สอย่างชัดเจน (เช่น เมทิล เอทิล คีโตน) แต่ทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวจะมีผลต่อการระเหยของ VOCs ในกลุ่มนี้อย่างมีนัยสำคัญ ผลของ hexadecanol และ octadecanol ต่อ ค่า K_{OL} ของ VOCs ต่างๆ และร้อยละการลดลงของ K_{OL} เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารลดแรง

ดึงผิว ดังแสดงใน Table 2 และ Table 3 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ทั้งกรณีที่ใช้ hexadecanol ในปริมาณ 25 ไมโครกรัม/ตร.ซม. และกรณีที่ใช้ octadecanol ในปริมาณ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม. สามารถลดการระเหยของ VOCs ทุกประเภทได้ในระดับที่น่าพอใจ จึงเป็นการยืนยันได้ว่าสามารถนำฟิล์มของสารลดแรงดึงผิวเหล่านี้ไปประยุกต์กับแหล่งน้ำจริงซึ่งอาจจะมี VOCs ปนอยู่ด้วยกันหลายชนิดได้

สมการเอมพิริคัลของ k_G และ k_L สำหรับทำนายการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำที่ปกคลุมด้วยฟิล์มของสารลดแรงดึงผิว

สมการเอมพิริคัลของ k_G

จากข้อมูลของ k_G ของเมทานอลที่ปริมาณของสารลดแรงดึงผิวต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ใน Figure 3 พบว่าความ

Table 2. Influence of hexadecanol (25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) on overall mass transfer coefficient of various volatile organic compounds

Volatile organic compound	K_{OL} (without film) (m/s)	K_{OL} (with film) (m/s)	Reduction in K_{OL} (%)**
Methanol	2.54×10^{-7}	1.11×10^{-7}	56
Acetone	1.14×10^{-6}	2.84×10^{-7}	75
MEK	1.18×10^{-6}	4.44×10^{-7}	62
Toluene	1.75×10^{-5}	4.36×10^{-6}	75

$$\text{** Reduction in } K_{OL} = \frac{K_{OL}(\text{with out film}) - K_{OL}(\text{with film})}{K_{OL}(\text{with out film})} \times 100$$

Table 3. Influence of octadecanol (15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) on overall mass transfer coefficient of various volatile organic compounds

Volatile organic compound	K_{OL} (without film) (m/s)	K_{OL} (with film) (m/s)	Reduction in K_{OL} (%)**
Methanol	2.54×10^{-7}	1.11×10^{-7}	56
Acetone	1.14×10^{-6}	4.94×10^{-7}	57
MEK	1.18×10^{-6}	3.65×10^{-7}	69
Toluene	1.75×10^{-5}	3.54×10^{-6}	80

$$\text{** Reduction in } K_{OL} = \frac{K_{OL}(\text{with out film}) - K_{OL}(\text{with film})}{K_{OL}(\text{with out film})} \times 100$$

สัมพันธระหว่าง k_G กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในทั้งกรณีของ hexadecanol และ octadecanol สามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงคือช่วงแรกเป็นช่วงที่ k_G ลดลงลงในลักษณะเป็นเอ็กโปเนนเชียลกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับ ปริมาณของสารลดแรงตึงผิว (S) ในช่วงแรกนี้สามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$k_{G,s}(methanol) = k_{G,o}(methanol)\exp(-a_G * S) \quad (5)$$

เมื่อ $k_{G,o}(methanol)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเติม ลดแรงตึงผิว, m/s

$k_{G,s}(methanol)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว, m/s

a_G = ค่าคงที่ที่เป็นบวก, $\text{cm}^2/\mu\text{g}$ และ

S = ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เติม, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

และสำหรับช่วงที่สองซึ่งเป็นช่วงที่ k_G มีค่าคงที่นั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับ S สามารถแทนได้ด้วยสมการ (6)

$$k_{G,s}(methanol) = C_G \quad (6)$$

Hexadecanol:

$$k_{G,s}(methanol) = 8.83 \times 10^{-4} \exp(-0.031S), 0 \leq S < 20 \quad (7)$$

$$k_{G,s}(methanol) = 3.80 \times 10^{-4}, 20 \leq S \leq 30 \quad (8)$$

Octadecanol:

$$k_{G,s}(methanol) = 8.83 \times 10^{-4} \exp(-0.061S), 0 \leq S < 15 \quad (9)$$

$$k_{G,s}(methanol) = 3.93 \times 10^{-4}, 15 \leq S \leq 25 \quad (10)$$

Hexadecanol:

$$k_{G,s}(VOC) = 8.83 \times 10^{-4} \exp(-0.031S) \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{Methanol-air \text{ at } 27^\circ C}} \right), 0 \leq S < 20 \quad (11)$$

Table 4. Constant a_G and c_G for hexadecanol and octadecanol

S ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Hexadecanol		Octadecanol		
	a_G ($\text{cm}^2/\mu\text{g}$)	c_G (m/s)	S ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	a_G ($\text{cm}^2/\mu\text{g}$)	c_G (m/s)
$0 \leq S < 20$	0.031	-	$0 \leq S < 15$	0.061	-
$20 \leq S \leq 30$	-	3.80×10^{-4}	$15 \leq S \leq 25$	-	3.93×10^{-4}

เมื่อ $k_{G,s}(methanol)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของเมทานอลเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว, m/s

C_G = ค่าคงที่ที่เป็นบวก, m/s

จากการวิเคราะห์ข้อมูล k_G ของเมทานอลกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวทั้งในกรณีของ hexadecanol และกรณีของ octadecanol โดยการทำให้ non-linear regression จะได้ ค่าคงที่ a_G และ c_G ดัง Table 4 และเนื่องจาก $k_{G,o}(methanol)$ มีค่าเท่ากับ 8.83×10^{-4} m/s ดังนั้นจะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{G,s}(methanol)$ กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิว สำหรับกรณีของ hexadecanol และ octadecanol ดังสมการ (7) ถึงสมการ (10)

โดย $k_{G,s}(methanol)$ ที่คำนวณได้จากสมการ (7) ถึง สมการ (10) ได้แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองใน Figure 5 และ Figure 6 สำหรับกรณีของ hexadecanol และ octadecanol ตามลำดับ

สมการเอมพิริคัลของ $k_{G,s}(methanol)$ ดังสมการ (7) ถึงสมการ (10) สามารถปรับแก้ให้สามารถใช้ได้กับ VOCs ใดๆ โดยใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) เป็นตัวปรับแก้ตามทฤษฎีสองฟิล์ม (Whitman, 1923) จะได้ดังสมการ (11)

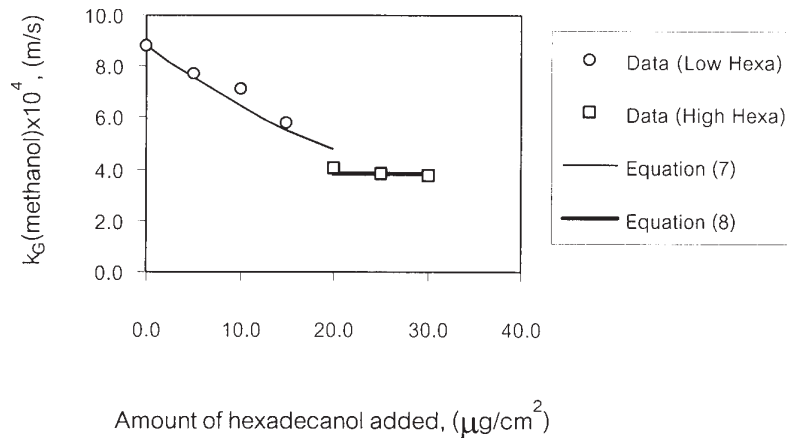


Figure 5. Effect of hexadecanol on gas film coefficient for evaporation of methanol from water at 27 °C

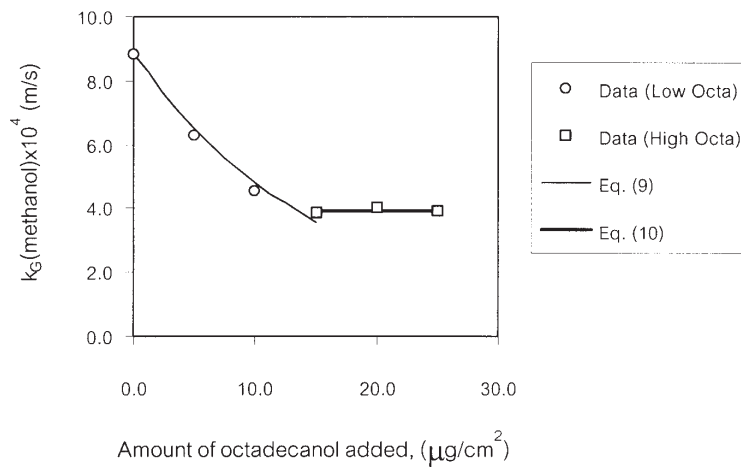


Figure 6. Effect of octadecanol on gas film coefficient for evaporation of methanol from water at 27 °C

$$k_{G,s}(VOC) = 3.80 \times 10^{-4} \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{Methanol-air \text{ at } 27^\circ C}} \right), 20 \leq S \leq 30 \tag{12}$$

Octadecanol:

$$k_{G,s}(VOC) = 8.83 \times 10^{-4} \exp(-0.061S) \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{Methanol-air \text{ at } 27^\circ C}} \right), 0 \leq S < 15 \tag{13}$$

$$k_{G,s}(VOC) = 3.93 \times 10^{-4} \left(\frac{D_{VOC-air}}{D_{Methanol-air \text{ at } 27^\circ C}} \right), 15 \leq S \leq 25 \tag{14}$$

สมการ (11)-(14) สามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สของ VOCs ใดๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ นอกเหนือจากที่ 27 °C ได้โดยต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่

อุณหภูมินั้น อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้ในช่วงปริมาณของ hexadecanol และหรือ octadecanol ตามที่ระบุข้างต้นเท่านั้น

สมการเอ็มพิริคัลของ k_L

จากข้อมูลของ k_L ของทุโลอินที่ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ใน Figure 3 จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในทั้งกรณีของ hexadecanol และ octadecanol เป็นไปทำนองเดียวกันกรณีของความสัมพันธ์ระหว่าง k_G กับปริมาณของ

สารลดแรงตึงผิว จึงสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวทั้งกรณีของ hexadecanol และ octadecanol ได้ในทำนองเดียวกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิว (S) ในช่วงที่ k_L ลดลง เป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$k_{L,S}(toluene) = k_{L,0}(toluene) \exp(-a_L * S), \tag{15}$$

เมื่อ $k_{L,0}(toluene)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทุโลอินภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว, m/s

$k_{L,S}(toluene)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทุโลอิน เมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว, m/s

a_L = ค่าคงที่ที่เป็นบวก, $cm^2/\mu g$ และ

S = ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เติม, $\mu g/cm^2$

และสำหรับช่วงที่ k_L มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง k_L กับ S สามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$k_{G,S}(toluene) = c_L \tag{16}$$

เมื่อ $k_{L,S}(toluene)$ = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของทุโลอิน เมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว, m/s

c_L = ค่าคงที่ที่เป็นบวก, m/s

ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูล $k_L(toluene)$ กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวทั้งในกรณีของ hexadecanol และกรณีของ octadecanol โดยการทำ non-linear regression จะได้ ค่าคงที่ a_L และ c_L ดัง Table 5 และเนื่องจาก $k_{L,0}$

(*toluene*) มีค่าเท่ากับ 1.75×10^{-5} m/s ดังนั้นจะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{L,S}(toluene)$ กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิว สำหรับกรณีของ hexadecanol และ octadecanol ดังสมการ (17)-สมการ (20)

Hexadecanol:

$$k_{L,S}(toluene) = 1.75 \times 10^{-5} \exp(-0.095S), 0 \leq S < 20 \tag{17}$$

$$k_{L,S}(toluene) = 4.41 \times 10^{-6}, 20 \leq S \leq 30 \tag{18}$$

Octadecanol:

$$k_{L,S}(toluene) = 1.75 \times 10^{-5} \exp(-0.341S), 0 \leq S < 15 \tag{19}$$

$$k_{L,S}(toluene) = 3.53 \times 10^{-6}, 15 \leq S \leq 25 \tag{20}$$

Table 5. Constant a_L and c_L for hexadecanol and octadecanol

Hexadecanol			Octadecanol		
S ($\mu g/cm^2$)	a_L ($cm^2/\mu g$)	c_L (m/s)	S ($\mu g/cm^2$)	a_L ($cm^2/\mu g$)	c_L (m/s)
$0 \leq S < 15$	0.095	-	$0 \leq S < 15$	0.341	-
$15 \leq S \leq 25$	-	4.41×10^{-6}	$5 \leq S \leq 20$	-	3.53×10^{-6}

โดย $k_{L,s}(toluene)$ ที่คำนวณได้จากสมการ (17) ถึง สมการ (20) ได้แสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองใน Figure 7 และ Figure 8 สำหรับกรณีของ hexadecanol และ octadecanol ตามลำดับ

สมการเอมพิริคัลของ $k_{L,s}(toluene)$ ดังสมการ (17) ถึง สมการ (20) สามารถปรับแก้ให้สามารถใช้ได้กับ VOCs ใดๆ โดยใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) เป็นตัวปรับแก้ตามทฤษฎีสองฟิล์ม (Whitman, 1923) จะได้

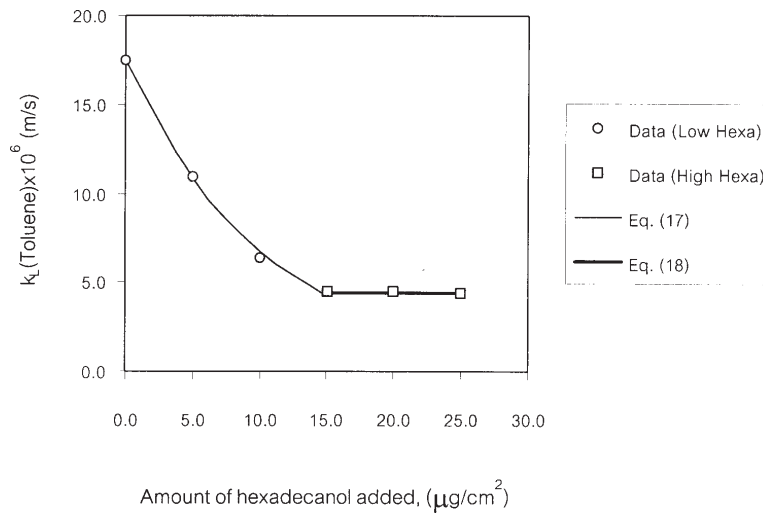


Figure 7. Effect of hexadecanol on liquid film coefficient for evaporation of toluene from water at 27 °C

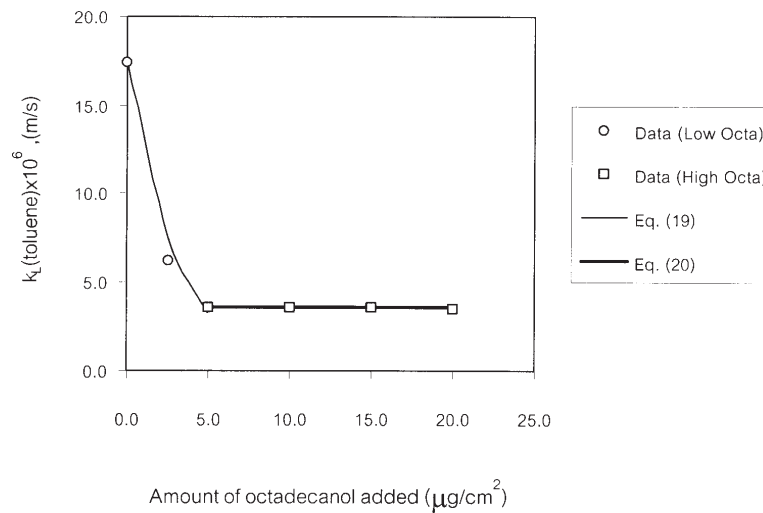


Figure 8. Effect of octadecanol on liquid film coefficient for evaporation of toluene from water at 27 °C

Hexadecanol:

$$k_{L,s}(VOC) = 1.75 \times 10^{-5} \exp(-0.095S) \left(\frac{D_{VOC-water}}{D_{Toluene-water \text{ at } 27^\circ C}} \right), 0 \leq S < 20 \quad (21)$$

$$k_{L,s}(VOC) = 4.41 \times 10^{-6} \left(\frac{D_{VOC-water}}{D_{Toluene-water \text{ at } 27^\circ C}} \right), 20 \leq S \leq 30 \quad (22)$$

Octadecanol:

$$k_{L,s}(VOC) = 1.75 \times 10^{-5} \exp(-0.341S) \left(\frac{D_{VOC-water}}{D_{Toluene-water \text{ at } 27^\circ C}} \right), 0 \leq S < 15 \quad (23)$$

$$k_{L,s}(VOC) = 3.53 \times 10^{-6} \left(\frac{D_{VOC-water}}{D_{Toluene-water \text{ at } 27^\circ C}} \right), 15 \leq S \leq 25 \quad (24)$$

สมการ (21)-(24) สามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวของ VOCs ใดๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ นอกเหนือจากที่ 27 °C ได้โดยต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมินั้น อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้ในช่วงปริมาณของ hexadecanol และหรือ octdecanol ตามที่ระบุข้างต้นเท่านั้น

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการสำหรับทำนายสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลว

จากชุดสมการของ $k_{G,s}(VOC)$ ดังแสดงด้วยสมการ (11)-(14) ชุดสมการของ $k_{L,s}(VOC)$ ดังแสดงด้วยสมการ (21)-(24) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_{OL} กับ k_G และ k_L ดังสมการ (2) ทำให้สามารถทำนาย K_{OL} ของ VOC ใดๆ ที่ระเหยจากแหล่งน้ำที่คลุมด้วยฟิล์มของ hexadecanol หรือฟิล์มของ octdecanol ได้ จากการใช้ชุดสมการดังกล่าวร่วมกับค่า H และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการตรวจเอกสาร (Staudinger and Roberts, 1996; Reid *et al*, 1988) ค่าพารามิเตอร์ k_G , k_L , และ K_{OL}

ของ เมทานอล อะซีโตน MEK และ ทูโลอิน ได้ผลการคำนวณดังแสดงใน Table 6-Table 9 และผลการเปรียบเทียบระหว่าง K_{OL} ที่ได้จากการคำนวณกับ K_{OL} ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะเดียวกันแสดงใน Figure 9 จากรูปดังกล่าว จะพบว่า ค่า K_{OL} ที่วัดได้จากการทดลองและค่า K_{OL} ที่ทำนายหรือคำนวณโดยใช้สมการเอ็มพิริคัลที่พัฒนาขึ้นจะกระจายตัวอยู่รอบๆ เส้นที่แสดงความสอดคล้องระหว่างค่าทั้งสอง แสดงว่าสมการเอ็มพิริคัลที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง จึงสามารถใช้ชุดสมการดังกล่าวในการทำนาย K_{OL} และค่าพารามิเตอร์ระเหยของ VOCs ใดๆ ที่สนใจ จากแหล่งน้ำที่ปกคลุมด้วยฟิล์มของ hexadecanol และ octdecanol ในช่วงปริมาณที่ระบุข้างต้นได้

บทสรุป

จากการศึกษาผลของ hexadecanol และ ผลของ octdecanol ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในกระบวนการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำ พบว่าฟิล์มของสาร

Table 6. Calculated mass transfer coefficient (k_G , k_L and K_{OL}) of methanol at various conditions

Surfactant type	Surfactant amount ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	k_G (m/s)	k_L (m/s)	K_{OL} (m/s)
Hexadecanol	25	3.80×10^{-4}	8.19×10^{-6}	1.08×10^{-7}
Octadecanol	15	3.93×10^{-4}	6.56×10^{-6}	1.11×10^{-7}
None	None	8.83×10^{-4}	3.25×10^{-5}	2.52×10^{-7}

Table 7. Calculated mass transfer coefficient (k_G , k_L and K_{OL}) of acetone at various conditions

Surfactant type	Surfactant amount ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	k_G (m/s)	k_L (m/s)	K_{OL} (m/s)
Hexadecanol	25	2.80×10^{-4}	5.72×10^{-6}	3.90×10^{-7}
Octadecanol	15	2.89×10^{-4}	4.58×10^{-6}	3.95×10^{-7}
None	None	6.49×10^{-4}	2.27×10^{-5}	9.32×10^{-7}

Table 8. Calculated mass transfer coefficient (k_G , k_L and K_{OL}) of MEK at various conditions

Surfactant type	Surfactant amount ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	k_G (m/s)	k_L (m/s)	K_{OL} (m/s)
Hexadecanol	25	2.45×10^{-4}	4.90×10^{-6}	4.99×10^{-7}
Octadecanol	15	2.53×10^{-4}	3.92×10^{-6}	5.01×10^{-7}
None	None	5.70×10^{-4}	1.94×10^{-5}	1.21×10^{-6}

Table 9. Calculated mass transfer coefficient (k_G , k_L and K_{OL}) of toluene at various conditions

Surfactant type	Surfactant amount ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	k_G (m/s)	k_L (m/s)	K_{OL} (m/s)
Hexadecanol	25	2.20×10^{-4}	4.41×10^{-6}	4.13×10^{-6}
Octadecanol	15	2.28×10^{-4}	3.53×10^{-6}	3.35×10^{-7}
None	None	5.12×10^{-4}	1.75×10^{-5}	1.57×10^{-7}

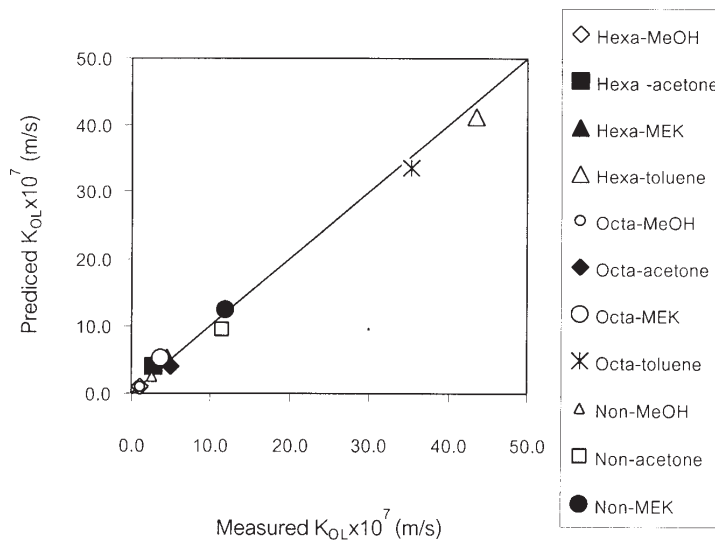


Figure 9. Comparison of overall mass transfer coefficients for selected VOCs at 27 °C (Solid line represents perfect agreement between measured and predicted values)

ลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดสามารถลดการระเหยของ VOCs จากน้ำได้ดี โดยปริมาณของ hexadecanol และ ของ oct-decanol ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงควรมีค่าเป็น 25 และ 15 ไมโครกรัม/ตร.ซม.ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถลดการระเหยของ VOCs ได้ในช่วงตั้งแต่ 56-80 % ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของ VOCs ดังนั้นการใช้ hexadecanol หรือ octdecanol เพื่อควบคุมหรือลดการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำเปิดจริง จึงมีความเป็นไปได้สูง

สมการเอมพิริคัลของสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและของสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฟิล์มแก๊สและสัมประสิทธิ์ฟิล์มของเหลวกับปริมาณของสารลดแรงตึงผิว ที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษานี้สามารถใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของ VOCs ที่ระเหยจากแหล่งน้ำที่คลุมด้วยสารลดแรงตึงผิวได้ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนายอัตราการระเหยของ VOCs จากแหล่งน้ำที่มี hexadecanol หรือ oct-decanol ปกคลุมอยู่ได้ เมื่อทราบความเข้มข้นของ VOCs ในแหล่งน้ำ และ ปริมาณของ hexadecanol หรือ oct-decanol ที่ใช้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2544 ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาปริญญาโท และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่และให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือวิเคราะห์ สาธารณูปโภค งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- จรัญ บุญกาญจน์ เสภาภคย์ มาลากาญจน์ และ ชาคริต ทองอุไร. 2544ก. การควบคุมการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายโดยฟิล์มของสารลดแรงตึงผิว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11. 9-10 พฤศจิกายน 2544. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. จ.นครราชสีมา.
- จรัญ บุญกาญจน์ ปรียาภรณ์ ทองสร้อย และ ชาคริต ทองอุไร. 2544ข. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับทำนายอัตราการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งน้ำเปิด : ผลของความเร็วลม ว. สงขลานครินทร์ วทท. 23(2):265-274
- Bean, B.R. and Florey, Q.L. 1968. A field study of the effectiveness of fatty alcohol mixture as evaporation reducing monomolecular films. *Water Resour. Res.* 4: 206-208.
- Bunyakan, C., Tongsoy, P. and Tongurai, C. 2001. Film mass transfer coefficient for the prediction of volatile organic compound evaporation rate from open water basin. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 23(4) :563-577.
- O'Brien, R.N., Feher, A.I., Li, K.L. and Tan, W.C. 1976. The effect of monolayers on the rate of evaporation of H₂O and the solution of O₂ in H₂O. *Can. J. Chem.* 54: 2739-2744.
- Desai, A.C., Iyer, T.K. and Tople, V.M. 1990. Use of water evaporation retardants for water conservation, *J. of Indian Water Works Association.* April-June, 193-194.
- Reid, C.R., Prausnitz, M.J. and Poling, E.B. 1988. The properties of gas and liquids. McGraw-Hill book Company. New York:577-631.
- Schaffer, D.L. and Daubert, T.E. 1969. Gas-liquid chromatographic determination of solution properties of oxygenated compounds in water. *Anal. Chem.* 41:1585-1589
- Staudinger, J. and Roberts, P.V. 1996. A critical review of Henry's law constant for environmental applications. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 26: 205-297
- Whitman, W.G. 1923. *Chem. Metall. Eng.* 29:146